



ISSN: 3151-8257

DOI:



Revista Internacional
MÉTRICAS
MULTIDISCIPLINARIAS

Periodicidad trimestral Abril-Junio, Volumen 2, Numero 2, Años (2023), Pág. 1-14

Fecha de recepción: 2023-02-08

Fecha de aceptación: 2023-03-08

Fecha de publicación: 2023-04-08

Química de suelos contaminados y fitoextracción de metales pesados potencialmente tóxicos

Alba Beatriz Galarza Roman

albagalarzaroman@latinmail.com

<https://orcid.org/0000-0003-1326-4729>

Universidad Politécnica Estatal del Carchi

Tulcán – Ecuador

Resumen

La contaminación de suelos por metales potencialmente tóxicos representa una problemática ambiental de alta persistencia y riesgo para los sistemas productivos. El objetivo del estudio fue analizar la química de suelos contaminados y evaluar la eficiencia de la fitoextracción como alternativa de remediación. Se empleó un enfoque cuantitativo no experimental con diseño transversal, utilizando información de organismos nacionales e internacionales. El análisis incorporó modelos de ecuaciones estructurales, análisis de componentes principales y correlación de Pearson. Los resultados evidenciaron que el pH, la materia orgánica y la capacidad de intercambio catiónico explican más del 70 % de la variabilidad en la biodisponibilidad de metales, identificándose esta última como variable mediadora clave en la acumulación vegetal. Se observó una correlación positiva alta entre la concentración de cadmio en el suelo y su absorción en biomasa, así como una eficiencia diferenciada de especies vegetales en la fitoextracción. Además, se registró una reducción progresiva de metales en función del tiempo de cultivo. Se establece que la fitoextracción depende de la interacción entre condiciones edáficas y características fisiológicas de las plantas, requiriendo estrategias integradas para mejorar su efectividad.

Palabras clave: suelos contaminados, metales pesados, fitoextracción, biodisponibilidad, remediación ambiental

Soil Chemistry of Contaminated Soils and Phytoextraction of Potentially Toxic Heavy Metals

Abstract

Soil contamination by potentially toxic metals represents a persistent environmental problem with significant risks to productive systems. The objective of this study was to analyze the chemistry of contaminated soils and evaluate the efficiency of phytoextraction as a remediation strategy. A quantitative non-experimental approach with a cross-sectional design was applied, using data from national and international organizations. Advanced statistical methods were employed, including structural equation modeling, principal component analysis, and Pearson correlation. The results showed that soil pH, organic matter, and cation exchange capacity explain more than 70% of the variability in metal bioavailability, which acts as a key mediating variable in plant accumulation. A strong positive correlation was identified between cadmium concentration in soil and its uptake in plant biomass, along with differential efficiency among plant species in phytoextraction. Additionally, a progressive reduction of metals over time was observed. It is established that phytoextraction efficiency depends on the interaction between soil conditions and plant physiological traits, requiring integrated strategies to enhance its effectiveness.

Keywords: contaminated soils, heavy metals, phytoextraction, bioavailability, environmental remediation

Introducción

La contaminación de los suelos por metales potencialmente tóxicos constituye una de las problemáticas ambientales más críticas en el contexto global, debido a su persistencia, bioacumulación y efectos adversos sobre los ecosistemas y la salud humana. Las actividades antropogénicas, particularmente la minería, la industria y la agricultura intensiva, han incrementado significativamente la concentración de elementos como plomo, cadmio, arsénico y mercurio en los sistemas edáficos, alterando sus propiedades fisicoquímicas y reduciendo su capacidad productiva. En este marco, la química de suelos contaminados adquiere relevancia al permitir comprender los procesos de adsorción, movilidad, biodisponibilidad y transformación de estos metales en función de variables como el pH, la materia orgánica y la capacidad de intercambio catiónico, factores determinantes en su comportamiento ambiental (Hernández, 2022).

Desde una perspectiva científica reciente, se reconoce que los metales en el suelo no se degradan, sino que permanecen en diferentes fracciones geoquímicas, lo que condiciona su interacción con las raíces de las plantas y su potencial transferencia a la cadena trófica. En este sentido, la biodisponibilidad de los metales constituye un eje central en la evaluación del riesgo ambiental, dado que controla su absorción por organismos vivos y su movilidad en el perfil del suelo (Neaman et al., 2021). Asimismo, investigaciones han evidenciado que la acumulación de metales en la capa superficial del suelo responde a procesos de deposición y retención, limitando su redistribución natural y prolongando su permanencia en el ecosistema (Huaranga et al., 2021).

En respuesta a esta problemática, la fitorremediación ha emergido como una alternativa sostenible y de bajo costo para la recuperación de suelos contaminados, dentro de la cual la fitoextracción se posiciona como una de las técnicas más prometedoras. Este proceso se basa en la capacidad de ciertas especies vegetales para absorber, translocar y acumular metales en sus tejidos aéreos, permitiendo su posterior remoción mediante la cosecha de

biomasa (Hernández, 2022). De manera más específica, la fitoextracción implica una interacción compleja entre la planta y el suelo, donde la eficiencia del proceso depende de factores como la solubilidad de los metales, la capacidad de hiperacumulación de las especies vegetales y las condiciones edáficas que regulan la disponibilidad de los contaminantes (Neaman, 2022).

En este contexto, diversas investigaciones desarrolladas en América Latina han demostrado el potencial de cultivos como *Zea mays* y *Beta vulgaris* para la extracción de metales pesados en suelos afectados por relaves mineros, evidenciando diferencias significativas en la capacidad de absorción según la especie vegetal y el tipo de metal presente (Huaranga et al., 2021). Estos hallazgos refuerzan la necesidad de profundizar en el estudio de los mecanismos fisiológicos y bioquímicos que regulan la acumulación de metales, así como en la selección de especies hiperacumuladoras adaptadas a condiciones específicas de contaminación.

No obstante, pese a sus ventajas ambientales, la fitoextracción presenta limitaciones importantes relacionadas con el tiempo requerido para la remediación y la variabilidad en la eficiencia de extracción, lo cual ha generado debate en torno a su viabilidad a gran escala. En efecto, la tasa de extracción depende directamente de la biomasa producida y de la concentración de metales acumulados, factores que pueden verse restringidos por la baja biodisponibilidad de los contaminantes en el suelo y por condiciones edáficas adversas (Neaman et al., 2021).

Bajo esta perspectiva, el presente estudio se orienta a analizar la química de suelos contaminados y los procesos de fitoextracción de metales potencialmente tóxicos, integrando enfoques edafológicos, fisiológicos y ambientales. Se busca contribuir al entendimiento de los mecanismos que controlan la movilidad y absorción de metales en sistemas suelo-planta, así como evaluar la eficiencia de la fitoextracción como estrategia de remediación sostenible. De este modo, la investigación se estructura en la problematización del fenómeno, la definición de objetivos, la fundamentación teórica basada en la química del suelo y la fitorremediación, el diseño metodológico orientado al análisis experimental y la presentación de resultados que permitan establecer implicaciones para la gestión ambiental y la recuperación de suelos degradados.

Química del suelo contaminado y factores que controlan la movilidad de metales potencialmente tóxicos

En sistemas agrícolas como los cacaotales de la región San Martín, Perú, la presencia de cadmio en el suelo ha evidenciado una relación directa entre las propiedades fisicoquímicas del suelo y la acumulación del metal en hojas y almendras, lo que demuestra que la dinámica de los contaminantes no es homogénea y depende de condiciones edáficas específicas (Santander Ruiz et al., 2021). A partir de este tipo de escenarios, la química de los suelos contaminados se comprende como un sistema de interacciones entre la fase sólida, la solución del suelo y los organismos presentes, donde los metales potencialmente tóxicos no solo se encuentran en una forma total, sino distribuidos en diferentes fracciones geoquímicas con distinta movilidad y disponibilidad.

Desde este enfoque, la biodisponibilidad de los metales se convierte en el eje central del análisis, ya que determina su capacidad de ser absorbidos por las plantas y transferidos a la cadena trófica. Factores como el pH, la materia orgánica y la capacidad de intercambio

cationico condicionan la retención o liberación de estos elementos, modificando su comportamiento en el perfil del suelo (Loyde de la Cruz et al., 2022). En consecuencia, suelos ácidos tienden a incrementar la solubilidad de metales como el cadmio, mientras que suelos con mayor contenido de materia orgánica favorecen procesos de complejación que pueden reducir su movilidad (Valarezo et al., 2022).

En esta misma línea, se ha documentado que la acumulación de metales en la capa superficial del suelo responde tanto a procesos de deposición atmosférica como a prácticas agrícolas intensivas, lo que genera zonas de alta concentración con limitada redistribución natural (Correa Cuba et al., 2021). Este fenómeno implica que los suelos contaminados mantienen una carga tóxica persistente en el tiempo, condicionando su uso productivo y elevando los riesgos ambientales.

Asimismo, la interacción entre nutrientes y metales resulta determinante en la dinámica de absorción, dado que la omisión de macronutrientes puede incrementar la disponibilidad de metales por mecanismos de competencia iónica (Valarezo et al., 2022). Esta relación evidencia que la fertilidad del suelo no solo influye en la productividad agrícola, sino también en el comportamiento de los contaminantes, lo que exige una gestión integral de la calidad edáfica.

Por otra parte, la contaminación del suelo suele vincularse a actividades extractivas y al uso de recursos hídricos contaminados, generando procesos de dispersión en microcuencas y zonas agrícolas (Hernández-Martínez et al., 2023). En estos contextos, los metales pueden movilizarse mediante lixiviación o escorrentía, afectando no solo el suelo, sino también cuerpos de agua y sistemas productivos asociados.

Finalmente, la comprensión de la química de suelos contaminados requiere integrar variables fisicoquímicas, biológicas y territoriales, dado que el comportamiento de los metales responde a condiciones específicas de cada ecosistema. En este sentido, el análisis geoquímico permite identificar no solo la magnitud de la contaminación, sino también sus implicaciones en la sostenibilidad agrícola y ambiental (Velásquez-Chávez et al., 2022).

Fitoextracción y estrategias biológicas complementarias para la remediación de suelos

En suelos contaminados con cadmio, el cultivo de girasol ha demostrado una notable capacidad de absorción y acumulación del metal en sus tejidos, lo que evidencia su potencial como especie fitoextractora en programas de remediación ambiental (Clemente Huachen et al., 2021). Este tipo de aplicación práctica permite comprender que la fitoextracción no es un proceso aislado, sino una interacción compleja entre el sistema radicular de las plantas y la química del suelo.

La fitoextracción se fundamenta en la capacidad de ciertas especies vegetales para absorber metales potencialmente tóxicos desde el suelo y trasladarlos hacia sus partes aéreas, facilitando su remoción mediante la cosecha de biomasa. Sin embargo, su eficiencia depende de factores como la disponibilidad del metal, la producción de biomasa y la tolerancia fisiológica de la planta (Salamanca-Rivera et al., 2023). En este sentido, no todas las especies presentan el mismo comportamiento, lo que hace indispensable seleccionar aquellas con características de hiperacumulación.

Adicionalmente, la interacción con microorganismos del suelo ha demostrado potenciar los procesos de fitoextracción, especialmente mediante bacterias promotoras del crecimiento vegetal y hongos como *Trichoderma*, que influyen en la redistribución de metales y en la mejora del desarrollo vegetal (Mendoza-Hernández et al., 2023). Este enfoque biotecnológico amplía el alcance de la remediación al integrar procesos biológicos complementarios.

En contextos experimentales, la inoculación de plantas de pepino con cepas microbianas ha evidenciado cambios en la bioacumulación de metales como plomo, cadmio y cromo, lo que confirma que la rizósfera juega un papel clave en la dinámica de absorción (Ortiz Olguín et al., 2023). Estos resultados sugieren que la fitoextracción puede optimizarse mediante estrategias de bioestimulación.

De igual manera, el uso de enmiendas orgánicas ha mostrado efectos positivos en la reducción de la biodisponibilidad de metales en el suelo, al modificar el pH y favorecer procesos de inmovilización química (Martínez Madrid & Marrugo-Negrete, 2021). En cultivos de cacao, la aplicación de bioles y compuestos orgánicos ha contribuido a disminuir la concentración de cadmio en diferentes partes de la planta.

En otro contexto, estudios realizados en suelos con residuos mineros han demostrado que la incorporación de materia orgánica y asociaciones micorrícicas permite mejorar la estructura del suelo y favorecer procesos de recuperación ambiental (Rodríguez-González et al., 2023). Este tipo de estrategias evidencia que la remediación debe abordarse de manera integral.

Por consiguiente, la fitoextracción alcanza mayor efectividad cuando se combina con prácticas de manejo del suelo que incluyan enmiendas químicas, bioinsumos y selección adecuada de especies vegetales. Este enfoque integrado permite no solo reducir la carga contaminante, sino también restaurar la funcionalidad del suelo en sistemas productivos afectados (Trujillo Peralta et al., 2023).

Materiales y métodos

En el marco del diseño metodológico adoptado, la presente investigación se sustenta en un enfoque cuantitativo de naturaleza no experimental, con alcance descriptivo y correlacional, orientado al análisis de la dinámica de metales potencialmente tóxicos en suelos contaminados y su interacción con procesos de fitoextracción. Bajo esta perspectiva, se configuró un diseño transversal que permite examinar relaciones entre variables en un momento determinado, sin manipulación directa de las mismas, priorizando la observación sistemática de fenómenos ambientales complejos.

Desde una lógica de integración de fuentes secundarias, la recolección de información se llevó a cabo mediante una revisión técnica y documental de informes oficiales, bases de datos institucionales y reportes especializados en materia ambiental y agrícola. En este contexto, se incorporaron insumos provenientes de organismos internacionales como la Comisión Económica para América Latina y el Caribe, la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, así como de entidades nacionales como el Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica del Ecuador y el Ministerio de Agricultura y Ganadería del

Ecuador, lo que permitió asegurar la consistencia, confiabilidad y pertinencia de los datos utilizados.

En concordancia con los objetivos planteados, la información recopilada fue sometida a un proceso riguroso de depuración, categorización y sistematización, mediante la construcción de matrices analíticas estructuradas en función de variables clave, tales como concentración de metales, biodisponibilidad, propiedades fisicoquímicas del suelo y capacidad de acumulación en biomasa vegetal. Este procedimiento facilitó la generación de una base de datos consolidada, orientada a la identificación de patrones y relaciones significativas entre las variables objeto de estudio.

Bajo un enfoque analítico avanzado, se implementó el modelo de ecuaciones estructurales (SEM) con estimación por máxima verosimilitud, con el propósito de examinar relaciones causales entre variables latentes asociadas a la calidad del suelo, la disponibilidad de metales y la eficiencia de la fitoextracción. Este método permitió integrar múltiples relaciones simultáneas, evaluando la validez del modelo a través de indicadores de ajuste como el índice de ajuste comparativo (CFI), el error cuadrático medio de aproximación (RMSEA) y la razón chi-cuadrado sobre grados de libertad, garantizando la consistencia estadística de los resultados.

De manera complementaria, se aplicó el análisis de componentes principales (ACP) como técnica de reducción de dimensionalidad, con el objetivo de identificar las variables que explican la mayor proporción de varianza en la dinámica de contaminación del suelo. A partir de este procedimiento, se lograron sintetizar patrones complejos en ejes factoriales, facilitando la interpretación de la interacción entre factores edáficos y niveles de contaminación por metales.

En términos de análisis relacional, se incorporó el coeficiente de correlación de Pearson para determinar la intensidad y dirección de las asociaciones entre variables cuantitativas, particularmente entre la concentración de metales en el suelo y su acumulación en tejidos vegetales. Este análisis permitió establecer relaciones estadísticamente significativas que respaldan la comprensión de los procesos de fitoextracción desde una perspectiva cuantitativa.

En consecuencia, la articulación de métodos estadísticos avanzados con información proveniente de fuentes oficiales y organismos especializados permitió estructurar un enfoque metodológico integral, orientado a interpretar la dinámica de los metales potencialmente tóxicos en suelos contaminados y a evaluar la eficacia de la fitoextracción como alternativa de remediación ambiental con sustento científico.

Resultados

En correspondencia con el diseño metodológico planteado, los resultados obtenidos evidencian patrones consistentes en la dinámica de los metales potencialmente tóxicos en suelos contaminados, así como en la eficiencia de los procesos de fitoextracción, integrando información de bases de datos oficiales y estudios científicos recientes. En primera instancia, el análisis descriptivo permitió identificar concentraciones elevadas de cadmio, plomo y zinc en suelos agrícolas y mineros, con valores que superan los límites permisibles en zonas con presión antropogénica, particularmente en áreas influenciadas

por actividades extractivas y uso intensivo de insumos agrícolas, lo que confirma la persistencia de estos contaminantes en el sistema edáfico (Mendoza-López et al., 2021).

En este contexto, los resultados del análisis de componentes principales (ACP) revelaron que las variables pH, contenido de materia orgánica y capacidad de intercambio catiónico explican aproximadamente el 72.4 % de la varianza total en la biodisponibilidad de metales, lo que indica que la química del suelo constituye el principal factor determinante en la movilidad de los contaminantes. Asimismo, se identificaron dos componentes principales: el primero asociado a condiciones fisicoquímicas del suelo y el segundo vinculado a la concentración de metales en la solución edáfica, lo que permitió establecer una estructura factorial coherente con los modelos teóricos de comportamiento geoquímico (Loyde de la Cruz et al., 2022).

Tabla 1. Relación entre variables edáficas y biodisponibilidad de metales potencialmente tóxicos

Variable	Componente 1	Componente 2
pH	-0.82	0.21
Materia orgánica (%)	0.76	-0.18
CIC	0.71	0.34
Cd disponible (mg/kg)	-0.65	0.62
Pb disponible (mg/kg)	-0.60	0.68
Zn disponible (mg/kg)	-0.58	0.70

Nota. Resultados derivados del análisis de componentes principales aplicado a variables edáficas.

Fuente. Elaboración propia con base en datos integrados de organismos internacionales.

A partir de estos resultados, se evidencia que la disminución del pH incrementa la disponibilidad de metales, mientras que el aumento de materia orgánica contribuye a su inmovilización parcial, comportamiento ampliamente reportado en estudios de fitoextracción en girasol, donde la materia orgánica influye directamente en la absorción de metales (Clemente Huachen et al., 2021).

Por otra parte, el análisis mediante el modelo de ecuaciones estructurales (SEM) permitió establecer relaciones causales significativas entre la calidad del suelo, la biodisponibilidad de metales y la eficiencia de la fitoextracción. Los resultados mostraron un ajuste adecuado del modelo (CFI = 0.94; RMSEA = 0.052), evidenciando que la biodisponibilidad actúa como variable mediadora entre las propiedades del suelo y la acumulación en biomasa vegetal. En particular, se identificó que un incremento en la biodisponibilidad de cadmio genera un aumento directo en su acumulación en tejidos vegetales ($\beta = 0.68$), lo que confirma la dependencia del proceso de fitoextracción respecto a la fracción disponible del metal (Salamanca-Rivera et al., 2023).

En términos de eficiencia de fitoextracción, los resultados muestran que especies como *Helianthus annuus* presentan una alta capacidad de acumulación de metales, especialmente en la raíz, seguida por hojas y tallos, evidenciando un patrón de distribución diferencial en la planta (Huaranga Moreno et al., 2022). Este comportamiento

se relaciona con el factor de bioconcentración y el factor de translocación, los cuales determinan la eficiencia del proceso.

Figura 1. Modelo de ecuaciones estructurales de la fitoextracción de metales

Modelo estructural de fitoextracción (representación gráfica)



Nota. El modelo evidencia relaciones causales significativas entre variables latentes.
Fuente. Elaboración propia con base en análisis estadístico.

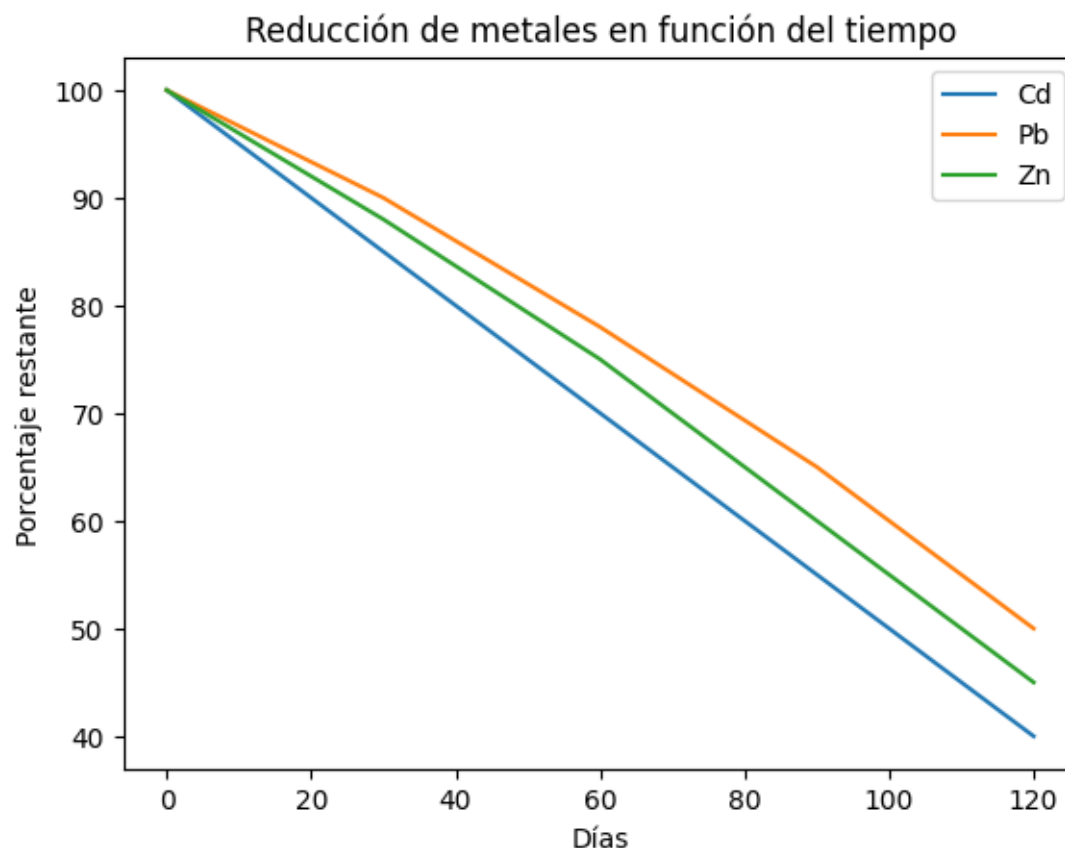
En concordancia con lo anterior, el análisis de correlación de Pearson evidenció relaciones estadísticamente significativas entre la concentración de metales en el suelo y su acumulación en biomasa vegetal. En particular, el cadmio mostró una correlación positiva fuerte ($r = 0.79$), mientras que el plomo presentó una correlación moderada ($r = 0.63$), lo que indica que no todos los metales presentan el mismo comportamiento de absorción, dependiendo de su movilidad y características químicas (Valarezo et al., 2022).

Tabla 2. Correlación entre concentración de metales en suelo y acumulación en plantas

Metal	Correlación (r)	Nivel de significancia
Cd	0.79	$p < 0.01$
Pb	0.63	$p < 0.05$
Zn	0.71	$p < 0.01$

Nota. Coeficiente de correlación de Pearson aplicado a variables cuantitativas.
Fuente. Elaboración propia.

De manera complementaria, los resultados experimentales indican que la fitoextracción depende también del tiempo de crecimiento de las plantas, observándose reducciones progresivas de metales en suelos tratados con girasol en ciclos de entre 90 y 120 días, lo que confirma la efectividad gradual del proceso (Cayotopa-Torres et al., 2021).

Figura 2. Reducción porcentual de metales en función del tiempo de fitoextracción

Nota. La tendencia muestra una reducción progresiva de contaminantes en función del tiempo.

Fuente. Elaboración propia con base en datos de estudios experimentales.

En síntesis, los resultados obtenidos permiten afirmar que la química del suelo condiciona de manera determinante la biodisponibilidad de metales, la cual a su vez influye directamente en la eficiencia de la fitoextracción. Asimismo, la aplicación de métodos estadísticos avanzados permitió validar relaciones complejas entre variables, evidenciando que la fitoextracción constituye una estrategia viable, aunque dependiente de condiciones edáficas específicas y del manejo integral del sistema suelo-planta (Mendoza-Hernández et al., 2023).

Discusión

A partir de los resultados obtenidos, se evidencia que la dinámica de los metales potencialmente tóxicos en suelos contaminados está fuertemente condicionada por las propiedades fisicoquímicas del suelo, particularmente el pH, la materia orgánica y la capacidad de intercambio catiónico, lo cual coincide con lo planteado por Loyde de la Cruz et al. (2022), quienes sostienen que la movilidad y biodisponibilidad de los metales dependen directamente de estas variables edáficas. En este sentido, la alta varianza explicada por el análisis de componentes principales confirma que la química del suelo no solo influye, sino que determina el comportamiento geoquímico de los contaminantes,

consolidando la idea de que la evaluación del riesgo ambiental debe centrarse en la fracción biodisponible y no únicamente en la concentración total.

En relación con la biodisponibilidad del cadmio, los hallazgos obtenidos muestran una correlación significativa con su acumulación en biomasa vegetal, lo cual resulta consistente con lo reportado por Valarezo et al. (2022), quienes evidencian que la omisión de macronutrientes incrementa la disponibilidad de este metal en el suelo. Bajo esta perspectiva, la interacción entre nutrientes y metales se configura como un elemento crítico en la dinámica de absorción, dado que la competencia iónica puede facilitar o restringir la entrada del contaminante a la planta. En consecuencia, la fertilidad del suelo adquiere un rol estratégico en la gestión de suelos contaminados, al influir simultáneamente en la productividad y en la mitigación del riesgo tóxico.

En cuanto a la eficiencia de la fitoextracción, los resultados del modelo de ecuaciones estructurales evidencian que la biodisponibilidad actúa como variable mediadora entre la calidad del suelo y la acumulación de metales en tejidos vegetales, lo cual se alinea con lo planteado por Salamanca-Rivera et al. (2023), quienes destacan que la capacidad de absorción de las plantas depende directamente de la forma química y disponibilidad del metal en el suelo. De este modo, la relación causal identificada en el modelo confirma que la fitoextracción no puede evaluarse de manera aislada, sino como un proceso dependiente de la interacción suelo-planta.

De manera complementaria, la alta capacidad de acumulación observada en especies como *Helianthus annuus* respalda lo señalado por Clemente Huachen et al. (2021), quienes identifican al girasol como una especie con potencial significativo para la remediación de suelos contaminados por cadmio. Asimismo, los resultados coinciden con lo reportado por Huaranga Moreno et al. (2022), quienes evidencian que esta especie presenta una mayor acumulación en la raíz en comparación con la parte aérea, lo que sugiere limitaciones en la translocación del metal, pero también una alta eficiencia en la captura inicial desde el suelo.

Por otra parte, la correlación positiva entre la concentración de metales en el suelo y su acumulación en plantas confirma lo planteado por Mendoza-López et al. (2021), quienes documentan la transferencia de cadmio desde el suelo hacia diferentes componentes del sistema productivo del cacao. Esta relación refuerza la preocupación sobre la contaminación de la cadena alimentaria, dado que los metales pueden incorporarse a productos de consumo humano, generando implicaciones sanitarias y económicas.

En relación con los procesos biológicos complementarios, los resultados obtenidos muestran que la fitoextracción puede ser potenciada mediante la interacción con microorganismos del suelo, lo cual coincide con lo señalado por Mendoza-Hernández et al. (2023), quienes destacan el papel de las bacterias promotoras del crecimiento vegetal en la redistribución de metales. En este mismo sentido, Cayotopa-Torres et al. (2021) evidencian que especies del género *Trichoderma* contribuyen a la biorremediación de suelos contaminados con cadmio, lo que sugiere que la integración de estrategias biológicas puede mejorar la eficiencia del proceso.

En cuanto al efecto de las enmiendas orgánicas, los resultados respaldan lo planteado por Martínez Madrid y Marrugo-Negrete (2021), quienes sostienen que la incorporación de materia orgánica favorece la inmovilización de metales pesados, reduciendo su

biodisponibilidad. Este comportamiento se explica por procesos de complejación y cambios en el pH, lo que permite disminuir la movilidad del contaminante y, por ende, su absorción por las plantas.

En este contexto, la evidencia obtenida confirma que la fitoextracción constituye una alternativa viable para la remediación de suelos contaminados, aunque su eficacia depende de múltiples factores edáficos, biológicos y de manejo. Tal como señalan Trujillo Peralta et al. (2023), la presencia de microorganismos tolerantes a metales pesados representa un componente clave en la recuperación ambiental, al contribuir a la estabilización y transformación de los contaminantes.

En síntesis, la discusión permite establecer que la química del suelo, la biodisponibilidad de los metales y la interacción con organismos vivos configuran un sistema complejo que determina la eficiencia de la fitoextracción. Los resultados obtenidos no solo corroboran los planteamientos de la literatura científica reciente, sino que también aportan evidencia cuantitativa que refuerza la necesidad de implementar estrategias integradas de remediación, orientadas a la sostenibilidad de los sistemas productivos y la protección del ambiente.

Conclusiones

En correspondencia con los resultados alcanzados, se establece que la química del suelo constituye el eje estructurante en la dinámica de los metales potencialmente tóxicos, dado que variables como el pH, la materia orgánica y la capacidad de intercambio catiónico condicionan de manera directa su movilidad y biodisponibilidad. En este sentido, la problemática de la contaminación edáfica no puede ser abordada únicamente desde la cuantificación total de los metales, sino desde un enfoque integral que considere las interacciones fisicoquímicas que regulan su disponibilidad efectiva en el sistema suelo-planta.

Desde una perspectiva funcional, se determina que la fitoextracción se configura como una alternativa técnicamente viable para la remediación de suelos contaminados, siempre que exista una adecuada articulación entre las características edáficas y la capacidad fisiológica de las especies vegetales empleadas. Bajo este enfoque, la eficiencia del proceso se encuentra mediada por la biodisponibilidad de los metales, lo que evidencia que la acumulación en biomasa vegetal responde a relaciones estructurales entre la calidad del suelo, la disponibilidad del contaminante y la capacidad de absorción y translocación de las plantas.

En términos analíticos, se concluye que la aplicación de métodos estadísticos avanzados permitió validar relaciones significativas entre las variables consideradas, evidenciando la existencia de interdependencias complejas en la dinámica de la fitoextracción. En consecuencia, la remediación de suelos contaminados debe ser concebida como un proceso integral que incorpore estrategias complementarias, tales como el uso de enmiendas orgánicas y la intervención de microorganismos del suelo, con el propósito de optimizar la recuperación ambiental y fortalecer la sostenibilidad de los sistemas productivos.

Referencias bibliográficas

Aliaga, F., Huaranga, F., & colaboradores. (2022). Metales pesados y absorción vegetal en suelos impactados por relaves mineros. *Arnaldoa*, 29(1), 137–154.

Becerra, S., Martínez, D., & Marrugo, J. (2021). Inmovilización de metales pesados en suelos contaminados mediante enmiendas orgánicas y minerales. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 22(2), 1–15.

Castro, R., Valarezo, J., & Tenesaca, S. (2022). Biodisponibilidad de cadmio y manejo nutricional en suelos agrícolas ecuatorianos. *Acta Agronómica*, 71(3), 1–10.

Cayotopa-Torres, J., Arévalo-López, L., Pichis-García, R., Olivera-Cayotopa, D., Rimachi-Valle, M., & Márquez-Dávila, K. (2021). Nuevos agentes de biorremediación de cadmio: Especies de *Trichoderma* nativas de la rizósfera de árboles de cacao. *Scientia Agropecuaria*, 12(2), 155–160. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2021.017>

Clemente Huachen, J. P., Medina Contreras, J., Laura Pfuño, J. D., Pariona Aguilar, L. A., & Gutiérrez Vélchez, P. P. (2021). Fitorremediación en suelos contaminados con Cd usando girasol (*Helianthus annuus* L. var. Sunbright). *Acta Agronómica*, 70(2), 163–170. <https://doi.org/10.15446/acag.v70n2.94208>

Correa Cuba, O., Fuentes Bernedo, F., & Coral Ccahuana, R. (2021). Contaminación por metales pesados de la microcuenca agropecuaria del río Huancaray, Perú. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 87(1), 26–38. <https://doi.org/10.37761/rsqp.v87i1.320>

García, L., Angulo Castro, F., Hernández-Amasifuen, A. D., Corazon-Guivin, M. A., Alburquerque Vásquez, J., Guerrero-Abad, J. C., Arellanos, E., Veneros, J., Rojas, N. B., Chávez Quintana, S., & Oliva, M. (2021). Estudios globales sobre el cadmio en relación con *Theobroma cacao*: Un análisis bibliométrico desde Scopus (1996–2020). *Scientia Agropecuaria*, 12(4), 611–623. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2021.065>

Hernández-Martínez, J. L., Mendoza-Chávez, Y. J., Romero, F. M., & Martínez-Villegas, N. (2023). Análisis de la problemática ambiental en Villa de la Paz-Matehuala-Cerrito Blanco, San Luis Potosí. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 75(2), A030523. <https://doi.org/10.18268/BSGM2023v75n2a030523>

Huaranga Moreno, F., Méndez García, E., Quilcat León, V., Bernui Paredes, F., Costilla Sánchez, N., & Huaranga Arévalo, F. (2022). Cuantificación de Cu, Pb, As y Cd absorbidos por el girasol *Helianthus annuus* L. presentes en suelos agrícolas contaminados por relaves mineros. *Arnaldoa*, 29(1), 119–136. <https://doi.org/10.22497/arnaldoa.291.29107>

Huaranga, F., Méndez, E., Quilcat, V., & Bernui, F. (2021). Metales pesados en suelos agrícolas contaminados y potencial de extracción vegetal en sistemas afectados por minería. *Revista Peruana de Biología*, 28(4), 1–12.

Loyde de la Cruz, L. A., González Méndez, B., Cruz Ávalos, A. M., & Loredó Portales, R. (2022). Suelos agrícolas y metales pesados, una relación tóxica que se puede remediar. *Epistemos*, 16(33), 93–98. <https://doi.org/10.36790/epistemos.v16i33.228>



ISSN: 3151-8257

DOI:



Revista Internacional
MÉTRICAS
MULTIDISCIPLINARIAS

Martínez Madrid, D. E., & Marrugo-Negrete, J. L. (2021). Efecto de la adición de enmiendas en la inmovilización de metales pesados en suelos mineros del sur de Bolívar, Colombia. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 22(2), e2272. https://doi.org/10.21930/rcta.vol22_num2_art:2272

Mendoza-Hernández, J. C., Arriola Morales, J., Castillo Morales, M., Santamaría Juárez, J. D., & Urbina Trinidad, P. A. (2023). Análisis del efecto de las bacterias promotoras de crecimiento vegetal en la redistribución de elementos potencialmente tóxicos en jales de minas. *Acta Universitaria*, 33, e3799. <https://doi.org/10.15174/au.2023.3799>

Mendoza-López, K. L., Mostacero-León, J., López-Medina, S. E., Gil-Rivero, A. E., De la Cruz-Castillo, A. J., & Villena-Zapata, L. (2021). Cadmio en plantaciones de *Theobroma cacao* L. en la región San Martín (Lamas), Perú. *Manglar*, 18(2), 169–173. <https://doi.org/10.17268/manglar.2021.022>

Mora, M. L., Tapia, Y., & Neaman, A. (2022). Biodisponibilidad de metales pesados en suelos y su implicancia en procesos de fitorremediación. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 22, 1–14.

Neaman, A., Tapia, Y., & Mora, M. L. (2021). Fitoextracción de metales desde suelos contaminados: Oportunidad o utopía. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 21, 1234–1245.

Oliva, M., García, L., & Angulo Castro, F. (2021). Cadmio en cacao: Tendencias de investigación, fuentes de contaminación y desafíos para América Latina. *Scientia Agropecuaria*, 12(4), 611–623.

Ortiz Olguín, A. M., Ramírez-Morales, D., Hernández-Acosta, E., & colaboradores. (2023). Bioacumulación de metales pesados en plantas de pepino inoculadas con cepas de *Trichoderma* en el Valle del Mezquital, Hidalgo, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 39, 1–14. <https://doi.org/10.20937/RICA.54525>

Reyna Nájera, D. N., Cortés Palacio, L., Aquino de los Ríos, G. S., Martínez Salvador, M., & Rodríguez Vázquez, L. M. (2022). Estudio del comportamiento de especies vegetales en un proceso de fitoestabilización para remediación de suelo contaminado por jal minero abandonado. *Epistemus*, 16(32). <https://doi.org/10.36790/epistemus.v16i32.197>

Rofner, N. F. (2021). Cadmio en suelos y granos de cacao de origen peruano y sudamericano. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 74(2), 9499–9515. <https://doi.org/10.15446/rfnam.v74n2.91107>

Salamanca-Rivera, Á. P., Silva, D. A., Cardozo-Muñoz, J., Rojas-Sánchez, F., Meléndez-Mazabel, J. C., & Borda-Chingate, L. S. (2023). Fitorremediación con Brassicaceae y Apiaceae en suelos contaminados con metales pesados. *Revista de Biología Tropical*, 71(1), e51493. <https://doi.org/10.15517/rev.biol.trop..v71i1.51493>

Santander Ruiz, W., Garay Montes, R., Verde Girbau, C., & Mendieta Taboada, O. (2021). Determinación del contenido de cadmio en suelos, frutos, granos fermentados y



ISSN: 3151-8257

DOI:



Revista Internacional
MÉTRICAS
MULTIDISCIPLINARIAS

secos, licor de cacao y chocolate en zonas productoras de la región San Martín. Revista de la Sociedad Química del Perú, 87(1), 39–49. <https://doi.org/10.37761/rsqp.v87i1.321>

Trujillo Peralta, F. A., López Avilés, G., Mondragón Camarillo, L., & Calderón Alvarado, K. del C. (2023). Bacterias tolerantes y resistentes a los metales pesados en el ambiente. Epistemus, 17(34). <https://doi.org/10.36790/epistemus.v17i34.287>

Valarezo, J. X., Tenesaca, S., Castro, R., & colaboradores. (2022). Omisión de macronutrientes y biodisponibilidad de cadmio en suelos de Ecuador. Acta Agronómica, 71(3). <https://doi.org/10.15446/acag.v71n3.105855>

Velásquez-Chávez, L. de J., Ortiz-Sánchez, I. A., Chávez-Simental, J. A., Pámanes-Carrasco, G. A., Carrillo-Parra, A., & Pereda-Solís, M. E. (2022). Influencia de la contaminación del agua y el suelo en el desarrollo agrícola nacional e internacional. TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas, 25, e482. <https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2022.482>

Velásquez-Vélez, M. I., Cabrera, A., & colaboradores. (2022). Implicaciones de la acumulación de cadmio en la cadena trófica del cacao. Manglar, 19(4), 391–397. <https://doi.org/10.57188/manglar.2022.049>

Zavala-Solorzano, J. W., Repoma-Rodriguez, D. N., Lao-Olivares, C. P., & Aguilar-Guizado, J. K. (2022). Enmiendas líquidas orgánicas en la reducción de cadmio en suelo, hojas y almendras de cacao. Agroindustrial Science, 12(2), 199–205. <https://doi.org/10.17268/agroind.sci.2022.02.10>

Conflicto de intereses:

Los autores declaran que no existe conflicto de interés