

Alternativas de Fitorremediación de Metales Pesados Presentes en Suelos con Cultivos de Maíz, un Caso de Estudio de la Provincia Los Ríos, Ecuador Alternatives for Phytoremediation of Heavy Metals Present in Soils with Corn Crops, a Case Study from Los Ríos province, Ecuador

Mariela Díaz-Ponce^{1†} , Roberto Barragán-Monrroy¹ ,
Ximena Cervantes-Molina¹  y Norma Guerrero-Chuez¹ 

¹ Universidad Técnica Estatal de Quevedo. Av. Quito km 1.5, Vía a Santo Domingo de los Tsáchilas. 120501 Quevedo, Los Ríos, Ecuador; (M.D.P.), (R.B.M.), (X.C.M.), (N.G.C.).

[†] Autora para correspondencia: mdiaz@uteq.edu.ec

RESUMEN

La contaminación del suelo por metales pesados derivados del uso intensivo de agroquímicos representa una amenaza creciente para la seguridad alimentaria y la sostenibilidad agrícola. Ante esta problemática, la fitorremediación se consolida como una técnica ecológica y de bajo costo que aprovecha la capacidad natural de las plantas para absorber y estabilizar contaminantes metálicos. El presente estudio tuvo como objetivo analizar las alternativas de fitorremediación de metales pesados presentes en suelos con cultivos de maíz (*Zea mays*) en la provincia de Los Ríos, Ecuador. Se aplicaron encuestas estructuradas a 260 agricultores de cinco cantones (Quevedo, Mocache, Quinsaloma, Pueblo Viejo y Ventanas) para identificar los tipos, dosis y frecuencia de uso de agroquímicos, y se elaboró una matriz de correspondencia entre ingredientes activos y metales asociados, contrastada con normativa ecuatoriana e internacional. Los resultados evidenciaron que el 21% de los agricultores utilizó herbicidas con atrazina, asociados a cadmio (Cd), plomo (Pb) y arsénico (As), mientras que la urea aportó Hg y Cd, siendo Mocache y Ventanas los cantones con las mayores dosis aplicadas. Además, se identificaron especies con alta capacidad bioacumuladora, destacando *Sansevieria trifasciata*, *Helianthus annuus* y *Sorghum bicolor*, las cuales presentan adaptabilidad local y potencial para esquemas de fitorremediación combinada. El estudio aporta información clave para la gestión agrícola sostenible en regiones tropicales. La principal contribución radica en el diseño de una estrategia de fitorremediación basada en especies ornamentales accesibles, capaz de reducir contaminantes metálicos, restaurar la fertilidad del suelo y promover prácticas agrícolas sostenibles, evidenciando la viabilidad técnica y ambiental de la fitorremediación como herramienta de mitigación en sistemas productivos locales.

Palabras clave: agroquímicos, biorremediación, plantas ornamentales.

SUMMARY

The soil contamination by heavy metals derived from the intensive use of agrochemicals represents a growing threat to food security and agricultural sustainability. In response to this problem, phytoremediation has emerged as an ecological and low-cost technique that takes advantage of plants' natural ability to absorb and stabilize metal contaminants. The objective of this study was to analyze phytoremediation alternatives for heavy metals present in soils with corn (*Zea mays*) crops in the province of Los Ríos, Ecuador. Structured surveys were administered to 260 farmers in five cantons (Quevedo, Mocache, Quinsaloma, Pueblo Viejo, and Ventanas) to identify the types, doses, and frequency of agrochemical use, and a



Cita recomendada:

Díaz-Ponce, M., Barragán-Monrroy, R., Cervantes-Molina, X., & Guerrero-Chuez, N. (2026). Alternativas de Fitorremediación de Metales Pesados Presentes en Suelos con Cultivos de Maíz, un Caso de Estudio de la Provincia Los Ríos, Ecuador. *Terra Latinoamericana*, 44, 1-13. e2434. <https://doi.org/10.28940/terralatinoamericana.v44i.2434>

Recibido: 16 de octubre de 2025.

Aceptado: 5 de diciembre de 2025.

Artículo. Volumen 44.

Abril de 2026.

Editor de Sección:

Dr. Fernando Abasolo Pacheco



Copyright: © 2026 by the authors.

Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC ND) License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

correspondence matrix was developed between active ingredients and associated metals, which was compared with Ecuadorian and international regulations. The results showed that 21% of farmers used herbicides containing atrazine, associated with cadmium (Cd), lead (Pb), and arsenic (As), while urea contributed Hg and Cd, with Mocache and Ventanas being the cantons with the highest doses applied. In addition, species with high bioaccumulation capacity were identified, notably *Sansevieria trifasciata*, *Helianthus annuus*, and *Sorghum bicolor*, which have local adaptability and potential for combined phytoremediation schemes. The study provides key information for sustainable agricultural management in tropical regions. Its main contribution lies in the design of a phytoremediation strategy based on accessible ornamental species, capable of reducing metal contaminants, restoring soil fertility, and promoting sustainable agricultural practices, demonstrating the technical and environmental viability of phytoremediation as a mitigation tool in local production systems.

Index words: agrochemicals, bioremediation, ornamental plants.

INTRODUCCIÓN

La contaminación del suelo constituye un problema ambiental de escala global, asociado a la generación y manejo inadecuado de desechos peligrosos provenientes de actividades industriales y agrícolas. En el sector agropecuario, el uso intensivo de plaguicidas y fertilizantes incrementa la concentración de metales pesados en el suelo, los cuales se consideran entre los contaminantes más persistentes y ampliamente distribuidos en los ecosistemas (Zhang *et al.*, 2020).

La presencia de metales pesados representa una amenaza preocupante para la productividad agrícola que se ha elevado desde 1900, la seguridad alimentaria y la salud humana; por la dificultad para recuperar las propiedades del suelo. El plomo, cadmio, cromo, mercurio y uranio, son tóxicos para las plantas y otros organismos en altas concentraciones. Además, los riesgos para la salud de agricultores evidencian varias enfermedades asociadas con la exposición a los plaguicidas (Qin *et al.*, 2021).

En el Ecuador, una amplia variedad de contaminantes químicos en el medio ambiente está creciendo constantemente por la agricultura convencional y el uso de pesticidas y fertilizantes de una forma indiscriminada, lo que ha llevado a la contaminación del suelo por metales pesados (Esparza-Olalla, Forero y Mardones, 2020). De acuerdo con el Módulo de Información Ambiental y Tecnificación ESPAC 2020, el uso de insumos de síntesis química se presentó en 56.8% de la superficie de cultivos permanentes y en 79.0% de los cultivos transitorios (INEC, 2021).

En los últimos años, la fitorremediación se ha consolidado como una tecnología verde con alto potencial para la restauración de suelos agrícolas contaminados, debido a su bajo costo, compatibilidad ecológica y facilidad de implementación. A diferencia de los métodos fisicoquímicos, esta técnica aprovecha la capacidad natural de ciertas especies vegetales para absorber, acumular, estabilizar o volatilizar contaminantes metálicos, reduciendo la toxicidad del medio sin alterar su estructura (Pérez-Moncada *et al.*, 2019; Patra, Pradhan y Patra, 2020; Shah y Daverey, 2020).

Diversas investigaciones han identificado especies de gran potencial fitorremediador como *Helianthus annuus*, *Sansevieria trifasciata* y *Sorghum bicolor*, por su capacidad para tolerar y acumular metales pesados en diferentes órganos, principalmente raíces y tallos (Li y Yang, 2020; Liu *et al.*, 2020; Alaboudi, Ahmed y Brodie, 2018). Estas plantas, además de remover contaminantes, contribuyen a mejorar las propiedades físico-químicas del suelo, favoreciendo la regeneración de la microbiota edáfica y el aumento de la materia orgánica (Jeevanantham *et al.*, 2019). Otras especies como *Phragmites australis* y *Vetiveria zizanioides* han demostrado una alta eficiencia en la inmovilización y extracción de contaminantes metálicos, incluso bajo condiciones edáficas adversas, lo que las posiciona como alternativas ampliamente utilizadas a nivel internacional en estrategias de biorremediación (Roongtanakiat y Chairaj, 2001).

La técnica de fitorremediación ha demostrado resultados prometedores en la descontaminación de suelos afectados por metales pesados, al reducir la movilidad del plomo y el cadmio mediante su acumulación en tejidos vegetales y su estabilización en raíces (Anas *et al.*, 2025). El propósito de este estudio, fue analizar las alternativas de fitorremediación de metales pesados presentes en suelos con cultivo de maíz (*Zea mays*) en la provincia de Los Ríos, Ecuador.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización del Área de Estudio

La investigación se la realizó en la zona norte de la provincia de Los Ríos (Figura 1), que abarca los cantones: Quevedo, Quinsaloma, Pueblo Viejo, Mocache y Ventanas. Esta región se distingue por albergar algunos de los suelos más productivos del país, condición asociada a su ubicación dentro de la cuenca del río Guayas, donde aproximadamente el 33.3% de la superficie es destinada a actividades agrícolas. Dichas actividades constituyen el principal motor económico local y se desarrollan bajo un régimen climático tropical cálido, con una estación seca que se extiende de junio a noviembre. La temperatura media anual oscila entre los 22 y 33 °C. La zona cuenta con una ventaja competitiva derivada de la disponibilidad directa de recursos naturales. Se localiza en la región Costa, en la zona central, y dispone de una extensión territorial cercana a los 7100 km² (Rodas, 2017¹). En este contexto, se recopiló información detallada sobre el uso, manejo y disposición final de fertilizantes, fungicidas, herbicidas e insecticidas empleados durante el proceso de cultivo de maíz.

Determinación de los Metales Pesados Potencialmente Aportados por los Agroquímicos en Suelos con Cultivos de Maíz

Tamaño muestral. El tamaño de la muestra se determinó en función del número total de Unidades de Producción Agropecuaria (UPAs) registradas en los cantones incluidos en el estudio, de acuerdo con los datos del III Censo Nacional Agropecuario (MAG, 2020). Para la selección de los 260 agricultores se aplicó un criterio estadístico basado en el muestreo probabilístico, considerando el tamaño poblacional de las UPAs, un nivel de confianza del 95%, un margen de error máximo permitido del 5% y la heterogeneidad esperada en las prácticas de manejo agrícola ($p = 0.5$). Bajo estas condiciones, el cálculo muestral arrojó un mínimo necesario de 260 participantes, garantizando suficiente representatividad para realizar inferencias válidas sobre el uso de insumos agroquímicos en el cultivo de maíz dentro de la zona de estudio.

Instrumento y recolección de datos. Se aplicó una encuesta (Jeevanantham *et al.*, 2019); a los productores de maíz para determinar el uso, tipo y frecuencia de aplicación de los agroquímicos (herbicidas, fungicidas, insecticidas y fertilizantes) en los cultivos. El cuestionario fue sometido a un proceso de validación de contenido mediante juicio de expertos ($n = 3$ especialistas en gestión agrícola y contaminación edáfica), quienes evaluaron pertinencia, claridad y coherencia de los ítems).

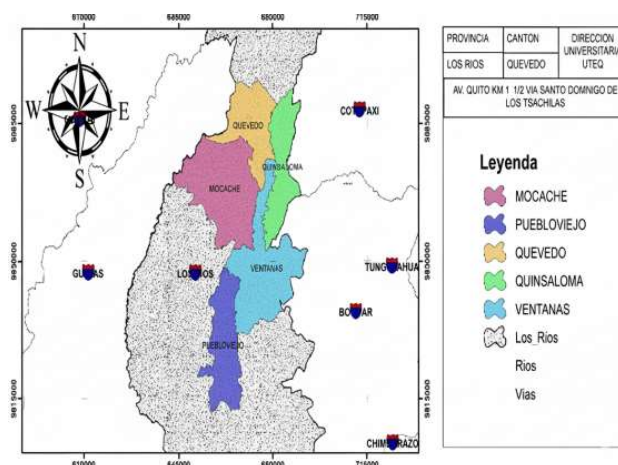


Figura 1. Localización del área de estudio. Zona norte de la provincia de Los Ríos.

Figure 1. Location of the study area. Northern part of the province of Los Ríos.

¹ Rodas, I. (2017). *Contaminación de los suelos agrícolas provocados por el uso de los agroquímicos de la parroquia San Joaquín*. Tesis para obtener el grado de Ingeniero Ambiental. Universidad Politécnica Salesiana. Disponible en <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/14712>

Identificación de componentes activos y metales asociados. Los agroquímicos reportados se contrastaron con listados normativos y bibliográficos: INEN 2266:2009 (INEN, 2013) (sustancias químicas peligrosas), Acuerdo Ministerial 142 del Ministerio del Ambiente y Agua del Ecuador (MAE, 2012), así como literatura científica sobre la presencia de metales en plaguicidas. Se elaboraron tablas para relacionar nombre comercial, ingrediente activo, metales pesados asociados (cadmio (Cd), plomo (Pb), arsénico (As), mercurio (Hg), zinc (Zn), cromo (Cr), entre otros) y efectos en el suelo.

Análisis estadístico. Para garantizar la validez de los resultados, los datos recopilados mediante encuestas a los agricultores fueron procesados con un enfoque estadístico multietapa. Los datos fueron analizados utilizando el software IBM SPSS Statistics v25[®] (IBM Corporation, 2017). Se realizaron comparaciones entre cantones. Para las variables categóricas (uso o no uso de un agroquímico), se utilizó la prueba de chi-cuadrado de independencia, y en los casos con frecuencias esperadas bajas se recurrió a la prueba exacta de Fisher. Para las variables continuas con distribución no normal, se aplicó la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis.

Posteriormente, con el fin de relacionar los productos agroquímicos reportados con los metales pesados asociados en la normativa ecuatoriana y literatura científica, se construyó una matriz binaria agroquímico-metal. En el mapa de calor resultante, el valor 1 indicó una asociación documentada, mientras que el valor 0 representó ausencia de evidencia científica o normativa de dicha relación. Este enfoque permitió identificar tanto los principales insumos vinculados con Cd, Pb y As, como aquellos sin relación confirmada.

Identificación de Especies Vegetales con Potencial Fitorremediador en Predios Agrícolas de Maíz

Dentro del mismo cuestionario aplicado a los agricultores para indagar sobre el uso de agroquímicos, se incluyó un bloque de preguntas orientado a registrar la presencia de especies vegetales cultivadas o presentes en los predios agrícolas. Entre las especies de interés se consideraron aquellas que la literatura científica reconoce con potencial fitorremediador, tales como *Helianthus annuus* (girasol), *Sorghum bicolor* (sorgo), *Sansevieria trifasciata* (lengua de suegra), *Cymbopogon citratus* (hierbaluisa) y *Typha latifolia* (cola de gato). Estas especies fueron seleccionadas por su capacidad reportada de absorber, acumular o estabilizar metales pesados como cadmio (Cd), plomo (Pb), arsénico (As) y zinc (Zn).

Análisis de datos. Se aplicó una estadística descriptiva para calcular los porcentajes de presencia de cada especie vegetal por cantón, lo que permitió obtener un panorama inicial de la disponibilidad de especies con potencial fitorremediador en la zona de estudio. Posteriormente, se realizaron comparaciones entre cantones mediante la prueba de chi-cuadrado de independencia, con el objetivo de identificar diferencias significativas en la distribución de las especies. En aquellos casos en los que las frecuencias esperadas resultaron reducidas, se recurrió a la prueba exacta de Fisher, garantizando así la validez de los contrastes estadísticos.

Finalmente, para explorar patrones de coexistencia entre especies vegetales con potencial fitorremediador, se aplicó la correlación de Spearman en el software IBM SPSS Statistics v25[®] (IBM Corporation, 2017). Este análisis permitió evaluar la fuerza y dirección de las asociaciones entre las especies registradas en los cantones, considerando que la distribución de los datos no cumplía los supuestos de normalidad. Con ello se buscó identificar combinaciones de especies que tienden a presentarse de manera conjunta en los predios agrícolas, aspecto relevante para diseñar esquemas de fitorremediación integrados.

Diseño de Estrategia de Fitorremediación con Plantas Ornamentales Existentes en el Área de Estudio

Se realizó una revisión bibliográfica de investigaciones previas desarrolladas en contextos nacionales e internacionales. Esta revisión permitió identificar especies vegetales reportadas como bioacumuladoras de metales pesados (Cd, Pb, As, Hg) y evaluar su aplicabilidad en suelos agrícolas de maíz. Los criterios de selección de especies incluyeron:

- Evidencia científica sobre capacidad de bioacumulación y tolerancia a metales.
- Disponibilidad local de la especie ornamental en los cantones de estudio.
- Factibilidad de integración en el sistema agrícola de maíz, sin comprometer la producción.
- Potencial de mejora en las propiedades del suelo (estructura, pH, microbiota).

Con base en estos criterios, se seleccionaron las especies prioritarias, considerando además su distribución más uniforme dentro de la provincia de Los Ríos, lo que garantiza su disponibilidad y adaptabilidad en diferentes cantones. El diseño de la estrategia de fitorremediación contempló aspectos como el patrón de siembra, el área de cobertura, la capacidad de remediación y la disposición final de la biomasa tras el proceso de acumulación de metales.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tipos de Metales Pesados que Aportan los Plaguicidas Utilizados en el Proceso Agrícola de Maíz al Suelo

En los cantones de Quevedo, Mocache, Quinsaloma, Puebloviejo y Ventanas se identificó un conjunto de plaguicidas de uso frecuente en la producción de maíz (Cuadro 1). Entre los herbicidas predominan Prowl, Glifosato, Puñete, Amina, Accent, Gramoxone, Glucosonato de amonio y Atrazina. En fertilizantes, la Urea constituye el insumo principal, complementada por formulaciones diferenciadas para las etapas de inicio, engrose y final del cultivo. En el caso de los insecticidas destacan Radiant, Engeo, Afir y Proclaim, mientras que en los fungicidas se registraron Propiconazol, Thil, Bravo y Topgun.

Al relacionar estos productos con sus componentes activos y la evidencia normativa y científica disponible, se estableció que los metales pesados más frecuentes son cadmio (Cd), plomo (Pb) y arsénico (As), seguidos por mercurio (Hg), zinc (Zn) y cromo (Cr) (Cuadro 2). Estos elementos se asocian a efectos como la reducción de la fertilidad del suelo, la alteración de la microbiota edáfica y la pérdida de nutrientes, además de riesgos para la salud humana al ingresar en la cadena alimentaria.

En la producción de maíz, el control de malezas y la nutrición del suelo requieren el uso constante de plaguicidas; sin embargo, cuando se aplican en cantidades elevadas y sin un manejo técnico estandarizado, estos insumos favorecen la acumulación de metales pesados en el suelo, en particular cadmio (Cd) y plomo (Pb), elementos que deterioran la fertilidad edáfica y representan riesgos indirectos para la salud humana al incorporarse a la cadena alimentaria (Yi *et al.*, 2017).

Los resultados del presente estudio evidencian que los agricultores emplean dosis variables y no reguladas de agroquímicos, lo que intensifica el riesgo de contaminación. A nivel provincial, el 21% de los encuestados reportaron el uso de Atrazina (IC95 %: 17,3-24,7), herbicida asociado a la presencia de Cd, Pb y As, mientras que la aplicación recurrente de urea incrementa la acidez del suelo y libera Cd, Hg y As. En conjunto, estos patrones confirman que el cadmio y el plomo son los contaminantes más recurrentes en herbicidas, insecticidas y fungicidas, situación que concuerda con estudios internacionales que identifican a la actividad agrícola como una de las principales fuentes de contaminación por cadmio en suelos, con contribuciones superiores al 30% y consecuencias en la disminución de la fertilidad agrícola (Sun *et al.*, 2018; Fei *et al.*, 2019)

Análisis Estadísticos

La prueba chi-cuadrado mostró diferencias altamente significativas entre cantones en el patrón de uso de varios productos: En el caso del Glifosato ($\chi^2 = 116.99$; $p < 0.00001$), su uso fue marcadamente superior en Ventanas y Mocache, mientras que en Quevedo y Puebloviejo se registraron frecuencias considerablemente menores. De manera similar, Amina ($\chi^2 = 59.52$; $p < 0.00001$) se aplicó con mayor intensidad en Mocache, contrastando con Quinsaloma donde su uso fue reducido. El herbicida Gramoxone ($\chi^2 = 91.27$; $p < 0.00001$) presentó un patrón opuesto, siendo más empleado en Quinsaloma y Ventanas que en Quevedo.

Respecto a los insecticidas, aunque Proclaim, Radiant y Engeo fueron reportados con frecuencia, su distribución entre cantones no mostró diferencias significativas, lo que sugiere una aplicación relativamente homogénea en toda la zona de estudio. Por el contrario, el fungicida Propiconazol ($\chi^2 = 25.90$; $p = 0.00003$) presentó mayor prevalencia en Ventanas y Mocache, en comparación con Quinsaloma y Puebloviejo, donde se reportó un uso reducido. Finalmente, Accent ($\chi^2 = 24.64$; $p = 0.00006$) mostró también variabilidad territorial, con mayor aplicación en Quevedo y Ventanas (Cuadro 3).

Cuadro 1. Clasificación de los plaguicidas en el cultivo de maíz.
Table 1. Classification of pesticides in corn cultivation.

Categoría	Productos identificados
Herbicidas	Prowl, Glifosato, Puñete, Amina, Accent, Gramoxone, Glucosonato de amonio, Atrazina
Fertilizantes	Urea, Abono inicio, Abono engrose, Abono final
Insecticidas	Radiant, Engeo, Afir, Proclaim
Fungicidas	Propiconazol, Thil, Bravo, Topgun

Cuadro 2. Afectaciones de los plaguicidas al suelo.**Table 2. Effects of pesticides on soil.**

Herbicidas (Nombre Comercial)	Componente Activo	Beneficios	Metales Pesados	Efectos Negativos para el Suelo	Acuerdo 142 del Ministerio del Ambiente y Agua del Ecuador	Peligrosidad (INEN 2266)
Herbicida						
Atrazina +Ni Cosulfuron	Atrazine	Alta eficiencia en el control de las gramíneas. Inhibe la enzima sintasa de acetolactato. Altamente eficaz a bajas dosis en el control de algunas hojas anchas en maíz. Controlador de plagas como: Lechosa (<i>Euphorbia hirta</i>)	Arsénico (As); Plomo(Pb); Cadmio (Cd)	Disminución del rendimiento y fertilidad. Alteración biológica del suelo.	Si consta	Sensibilización cutánea Peligro por aspiración Peligro para el medio ambiente acuático
Fertilizante						
Urea	Nitrógeno	Aporta nitrógeno y es un nutriente esencial para el desarrollo de la planta. El nitrógeno es un componente de las vitaminas y de los componentes energéticos de las plantas. Alta solubilidad, fácil manejo y rápida disponibilidad de nutrientes. Rápida acción en corrección de deficiencias de nitrógeno.	Arsénico(As); Cadmio(Cd); Mercurio(Hg);	El uso prolongado de fertilizantes nitrogenados como la urea tiende a aumentar la acidez del suelo. Liberación de amoníaco al suelo en su proceso de descomposición.	Si consta	Irritación vías respiratorias. Irritación gástrica por la liberación de ácido sulfuroso. Dosis grandes pueden causar náuseas, vómitos, diarrea, dolores abdominales, trastornos circulatorios y depresión del sistema nervioso central.
Insecticida						
Affirm	Benzoato de emamectina	El mecanismo del insecticida lleva a la parálisis y finalmente a la muerte de la plaga. Biológicamente activo. Altamente activo contra una gran gama de especies entre ellos, Lepidópteros y algunos otros insectos incluyendo las garrapatas.	Cadmio(Cd); plomo(Pb); Zinc(Zn); Arsénico(As)	Aplicación de dosis no establecidas, altera la estructura del suelo. Alta toxicidad aguda para suelos aeróbicos.	Si consta	Irritación ocular Sensibilización respiratoria o cutánea
Fungicida						
Topgun	Azoxistrobina	Fungicida de acción protectante, curativo, erradicante, translaminar, y de propiedades sistémicas. Inhibe la germinación de la espora y el crecimiento del micelio y también muestra actividad antiesporulante.	Zinc(Zn); Arsénico(As); Cadmio(Cd).	Disminución de la capacidad auto depurador	No consta	Sensibilización cutánea Peligro por aspiración Peligro para el medio ambiente acuático

Por otra parte, El análisis mediante la prueba de Kruskal-Wallis evidenció diferencias estadísticamente significativas en las dosis de varios productos entre los cantones evaluados (Cuadro 4). En el caso del Glifosato ($H = 39.10; p < 0.00001$), se observó que los agricultores de Mocache y Ventanas aplican dosis considerablemente más altas en comparación con Quevedo y Pueblo Viejo, donde las cantidades reportadas fueron menores. Un patrón similar se registró para Amina ($H = 43.01; p < 0.00001$), con predominio en Mocache, mientras que Quinsaloma mostró las dosis más bajas.

Cuadro 3. Resultados de la prueba de chi-cuadrado para el uso de plaguicidas por cantón.
Table 3. Chi-square test results for pesticide use by county.

Plaguicida	χ^2	p-valor
Glifosato	116.99	< 0.00001
Amina	59.52	< 0.00001
Gramoxone	91.27	< 0.00001
Accent	24.64	0.000
Propiconazol	25.9	0.000

El herbicida Gramoxone ($H = 50.65$; $p < 0.00001$) presentó las mayores diferencias territoriales, destacando su aplicación en Quinsaloma y Ventanas frente a Quevedo, donde el uso en términos de dosis resultó limitado. En cuanto a fertilizantes, la Urea ($H = 12.50$; $p = 0.0059$) mostró una aplicación más intensiva en Ventanas, en contraste con menores cantidades reportadas en Pueblviejo y Quinsaloma. Finalmente, el fungicida Propiconazol ($H = 22.61$; $p = 0.00015$) se utilizó en dosis elevadas en Ventanas y Mocache, mientras que en Quevedo y Pueblviejo se aplicaron cantidades significativamente menores.

Estos hallazgos indican que no solo existen variaciones en la frecuencia de uso de agroquímicos, sino también en la intensidad de aplicación, lo que incrementa la probabilidad de acumulación diferencial de metales pesados en los suelos según el cantón. Cantones como Mocache y Ventanas concentran tanto la mayor diversidad de productos como las dosis más altas, lo que los posiciona como áreas críticas en términos de riesgo de contaminación edáfica.

Por otra parte, los mapas de calor binarios (Figura 2a-d) muestran la relación entre los diferentes grupos de agroquímicos empleados en el cultivo de maíz y los metales pesados documentados en normativa y literatura científica. En estas representaciones, el valor 1 indica una asociación comprobada entre el agroquímico y un metal, mientras que el valor 0 refleja la ausencia de evidencia registrada, lo cual no implica inexistencia absoluta de riesgo, sino falta de respaldo científico o normativo.

En el caso de los herbicidas (a), se observa que los productos más utilizados, como Prowl, Puñete y Atrazina, se vinculan con arsénico (As), cadmio (Cd) y plomo (Pb), metales que destacan por su alta frecuencia en este grupo. Herbicidas como Amina y Accent amplían el espectro al asociarse también con mercurio (Hg) y aluminio (Al), mientras que el Glucosonato de Amonio presenta un perfil más complejo, incorporando cromo (Cr), cobalto (Co) y níquel (Ni).

En los fertilizantes (b), los resultados muestran un patrón de asociación igualmente amplio. La urea se relaciona con As, Cd, Hg y Pb, mientras que las formulaciones de Yaramila (Inicio, Engrose y Final) incorporan además Cr, Mo y Zn, configurando un riesgo multielemental de gran relevancia ambiental.

Respecto a los insecticidas (c), todos los productos analizados presentan asociación con Cd y Pb, consolidando a estos dos metales como los contaminantes más recurrentes. Sin embargo, existen variaciones: Radiant o Solaris incorpora también Cr y Zn, mientras que Affirm y Proclaim presentan relaciones adicionales con As. Estas diferencias reflejan que, aunque existe un patrón común de riesgo, la toxicidad específica varía en función del ingrediente activo de cada insecticida.

Cuadro 4. Resultados de la prueba de Kruskal-Wallis para las dosis aplicadas de agroquímicos y fertilizantes por cantón.
Table 4. Results of the Kruskal-Wallis test for the doses of agrochemicals and fertilizers applied by county.

Producto	H	p-valor
Glifosato	39.10	< 0.00001
Amina	43.01	< 0.00001
Gramoxone	50.65	< 0.00001
Urea	12.50	0.0059
Propiconazol	22.61	0.00015

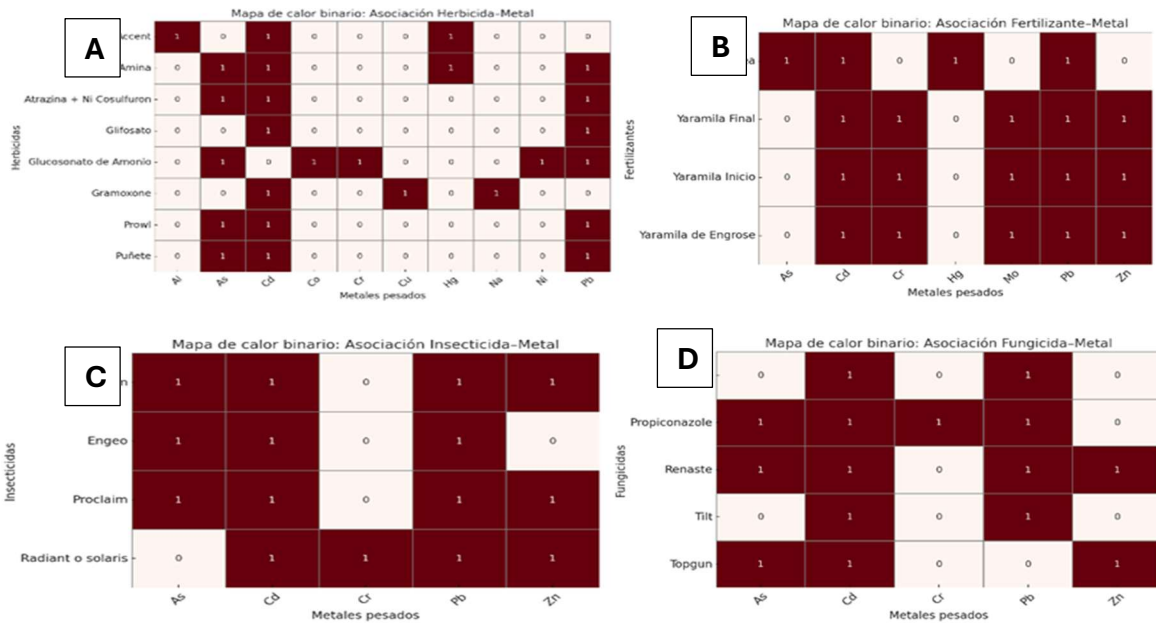


Figura 2. Mapas de calor agroquímicos-metales pesados: (a) Asociación herbicida-metal; (b) Asociación fertilizante-metal; (c) Asociación insecticida-metal; (c) Asociación fungicida-metal.
Figure 2. Agrochemical-heavy metal heat maps: (a) Herbicide-metal association; (b) Fertilizer-metal association; (c) Insecticide-metal association; (c) Fungicide-metal association.

Finalmente, los fungicidas (d) revelan que Cd y Pb son nuevamente los metales dominantes, especialmente en Tilt y Bravo. No obstante, productos como Propiconazol y Renaste se asocian con hasta cuatro metales diferentes, incluyendo As y Cr en el primero y As y Zn en el segundo.

Especies Vegetales con Potencial Fitorremediador en Predios Agrícolas de Maíz

El análisis de la presencia de especies vegetales con capacidad fitorremediadora evidencia diferencias notables entre los cantones estudiados (Mocache, Puebloviejo, Quevedo, Quinsaloma y Ventanas), lo cual condiciona la factibilidad de aplicar estrategias locales de mitigación de metales pesados (Figura 3).

En Mocache, se concentra el mayor potencial de fitorremediación, destacando la lengua de suegra con 50.36% (IC95%: 46.1-54.4), el girasol con 45.53% (IC95%: 41.2-49.7) y el sorgo con 36.68% (IC95%: 32.5-40.8). La presencia simultánea de estas especies, ampliamente documentadas como acumuladoras de cadmio y plomo, convierte a este cantón en un espacio prioritario para programas piloto de remediación.

Ventanas también presenta una alta diversidad, con porcentajes relevantes de lengua de suegra (44.55%; IC95%: 40.3-48.6), hierbaluisa (38.22%; IC95%: 34.1-42.1), alfalfa (36.54%; IC95%: 32.0-40.7) y girasol (34.35%; IC95%: 30.1-38.4). Este patrón confirma que el cantón dispone de un abanico de especies con mecanismos variados (fitoextracción, fitoestabilización), lo que amplía las posibilidades de implementación de estrategias combinadas.

En contraste, Quinsaloma registra una presencia concentrada en hierbaluisa (42.79%; IC95%: 38.1-47.3), pero porcentajes bajos o nulos de las demás especies. Esta situación indica un potencial limitado y dependiente de una sola especie, lo que puede reducir la eficacia de procesos multielementales de remediación.

Por su parte, Puebloviejo y Quevedo presentan los porcentajes más bajos de cobertura vegetal con potencial fitorremediador. En Puebloviejo, los valores máximos corresponden a alfalfa con 13.46% (IC95%: 10.8-16.1) y girasol con 12.21% (IC95%: 9.9-14.8) mientras que en Quevedo apenas destacan girasol con 16.79% (IC95%: 13.9-19.5) y sorgo con 8.49% (IC95%: 6.4-10.7). Estos resultados sugieren que, en ambos cantones, la aplicación de fitorremediación requeriría reforzar con siembras dirigidas para alcanzar niveles adecuados de eficacia.

En términos generales, el análisis confirma que las especies más frecuentes en la región son girasol, hierbaluisa y lengua de suegra, mientras que alfalfa y cola de gato muestran presencia más localizada. La heterogeneidad entre cantones revela que la factibilidad de estrategias fitorremediadoras no es uniforme, sino dependiente de la disponibilidad y diversidad local de especies.

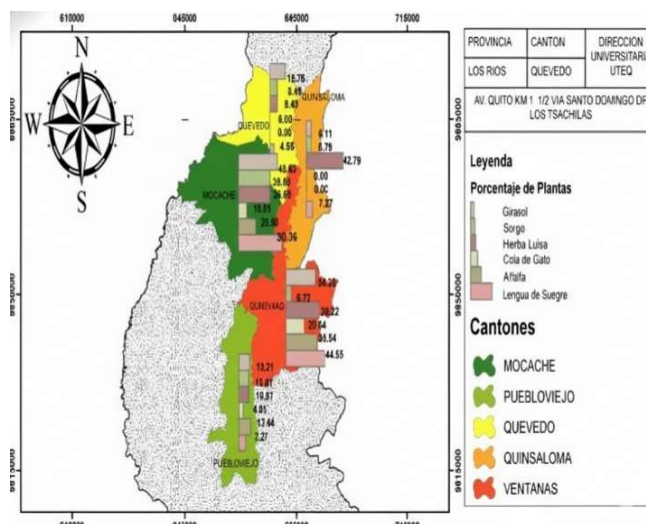


Figura 3. Distribución porcentual de especies fitorremedadoras por cantón.
Figure 3. Percentage distribution of phytoremediation species by county.

Análisis de Datos

La prueba de independencia de chi-cuadrado evidenció diferencias altamente significativas en la distribución de todas las especies vegetales con potencial fitorremediador entre los cantones analizados. Estos resultados confirman que la presencia de las especies no es homogénea, sino que varía de forma significativa entre cantones, lo cual refleja que la factibilidad de implementar estrategias de fitorremediación depende estrechamente de la disponibilidad local de especies. Los valores obtenidos fueron los siguientes (Cuadro 5).

En cuanto al análisis de correlaciones de Spearman, se observó una correlación perfecta y altamente significativa entre cola de gato y alfalfa ($\rho = 1.0$; $p < 0.001$), lo que indica que ambas tienden a presentarse conjuntamente en los mismos cantones. Asimismo, se identificaron correlaciones positivas fuertes, aunque no significativas entre cola de gato y lengua de suegra ($\rho = 0.82$; $p = 0.09$) y entre alfalfa y lengua de suegra ($\rho = 0.82$; $p = 0.09$). El resto de asociaciones fueron débiles o inconsistentes ($\rho < 0.50$; $p > 0.40$), lo que sugiere que especies como hierbaluisa presentan una distribución más independiente.

La fitorremediación se reconoce como una herramienta eficaz y sostenible para la eliminación de contaminantes presentes en el suelo, el aire y el agua (Ibrahim y Afandi, 2020). Se trata de una técnica relativamente sencilla, de bajo costo en comparación con otros métodos de remediación, y con la ventaja adicional de generar beneficios ambientales colaterales.

Cuadro 5. Resultados de la prueba de chi-cuadrado para la distribución de especies fitorremedadoras entre cantones.
Table 5. Results of the chi-square test for the distribution of phytoremediation species among cantons.

Especie	χ^2	p-valor
Girasol	61.89	< 0.001
Sorgo	59.67	< 0.001
Hierbaluisa	54.96	< 0.001
Cola de gato	45.92	< 0.001
Alfalfa	79.57	< 0.001
Lengua de suegra	116.40	< 0.001

En un estudio preliminar con la planta ornamental *Sansevieria trifasciata*, se evaluaron sus características de acumulación y tolerancia al cadmio (Cd), obteniéndose resultados positivos, ya que la especie mostró capacidad de bioconcentrar este metal en diferentes tejidos, confirmando su potencial como bioacumuladora en suelos afectados por agroquímicos (Li y Yang, 2020).

De manera similar, en Australia se desarrolló una investigación en suelos contaminados con Cd y Pb utilizando *Helianthus annuus* (girasol). Los hallazgos confirmaron que esta especie, gracias a sus características bioacumuladoras, es capaz de translocar metales pesados hacia sus raíces y tejidos, contribuyendo así a la disminución de contaminantes en el suelo y consolidándose como una alternativa eficiente de fitorremediación.

Estrategia de Fitorremediación con Plantas Ornamentales para el Mejoramiento del Suelo

El diseño de la estrategia de fitorremediación se estructuró en función de dos especies con alta disponibilidad en la zona de estudio y amplio respaldo científico sobre su capacidad bioacumuladora: *Sansevieria trifasciata* (lengua de suegra) y *Helianthus annuus* (girasol). Ambas especies fueron seleccionadas no solo por su tolerancia a cadmio (Cd) y plomo (Pb), sino también por su adaptabilidad a suelos agrícolas utilizados para el cultivo de maíz, cuyas propiedades edáficas particularmente la textura, el contenido de materia orgánica y la capacidad de intercambio catiónico (CIC) influyen directamente en la disponibilidad y movilidad de los metales, potenciando así la eficiencia del proceso de bioacumulación observado en los resultados del estudio (Ali, Khan y Sajad, 2013).

En el caso de *Sansevieria trifasciata*, la estrategia plantea su siembra alrededor de los cultivos de maíz, mediante trasplante o establecimiento con plántulas. Los resultados esperados incluyen: capacidad para equilibrar el pH del suelo, mejorar la nutrición edáfica y acumular cadmio en concentraciones de hasta 50 kg ha⁻¹ en raíces. La disposición final de la biomasa contempla el corte, incineración y disposición de cenizas en vertederos de seguridad, con el fin de evitar la reintegración de metales al ambiente.

Por su parte, *Helianthus annuus* se incorporó como especie complementaria con siembras dispersas de una a dos plantas por hectárea. Sus características bioacumuladoras le permiten concentrar plomo y cadmio en raíces y brotes, siendo especialmente eficiente en la remediación de cadmio. Además, su cultivo contribuye a mejorar la estructura del suelo, favorecer la proliferación de microorganismos y aumentar el contenido de nutrientes disponibles. Al igual que con la lengua de suegra, la disposición final recomendada es la incineración controlada de la biomasa contaminada (Figura 4).

La contaminación de suelos agrícolas por metales pesados, en particular cadmio (Cd) y plomo (Pb), constituye una problemática de gran escala, con más de 12 millones de hectáreas de tierras de cultivo afectadas a nivel mundial (Liu *et al.*, 2020). En este contexto, la implementación de sistemas de producción que integren técnicas de remediación es esencial para garantizar la sostenibilidad agrícola. Diversos estudios han demostrado la efectividad de cultivos como el sorgo, el cual ha mostrado capacidad para reducir las concentraciones de Cd y Pb en el suelo, al tiempo que genera beneficios económicos a través del aprovechamiento de su biomasa (Liu *et al.*, 2020).

El diseño de estrategias de fitorremediación in situ presenta ventajas significativas, ya que no genera afectaciones a la fauna ni riesgos directos para el consumo humano, al emplear especies no comestibles ni medicinales (Shah y Daverey, 2020). Este tipo de intervenciones permiten adaptar los patrones de siembra según la extensión de las áreas contaminadas, maximizando los beneficios sobre las propiedades del suelo. La disposición final de la biomasa es un componente crítico, y en la literatura se han reportado prácticas que incluyen la incineración controlada o su transformación en abono vegetal, dependiendo del nivel de acumulación de metales. En este sentido, la fitorremediación se consolida como una alternativa emergente y prometedora frente a la contaminación por metales pesados. Su principio se basa en la capacidad de determinadas especies vegetales de acumular concentraciones elevadas de contaminantes en sus tejidos, contribuyendo no solo a la descontaminación del suelo, sino también al restablecimiento de su fertilidad y a la sostenibilidad de los sistemas de producción agrícola (Marrero, 2015).

Diversos estudios han demostrado que la implementación de tecnologías convencionales de remediación de suelos contaminados por metales pesados, como el lavado químico o la sustitución del sustrato contaminado, implica costos elevados que pueden superar los USD 15 000 por hectárea, además de requerir maquinaria especializada y generar impactos ambientales secundarios. En contraste, las estrategias basadas en fitorremediación presentan costos significativamente inferiores, estimados entre USD 2500 y 4800 por hectárea, dependiendo de la densidad de siembra, mantenimiento y disposición de biomasa contaminada (Lewandowski, Schmidt, Londo y Faaij, 2006). Si bien los procesos de fitorremediación requieren mayores tiempos de recuperación (entre 2 y 5 años, según condiciones edáficas y concentración inicial de contaminantes), su implementación resulta más viable para sistemas agrícolas de pequeña y mediana escala, como los predominantes en la provincia de Los Ríos, especialmente cuando se integra dentro de los ciclos productivos. Estos antecedentes permiten concluir que la estrategia evaluada no solo es ambientalmente sostenible, sino también potencialmente rentable para productores locales, siempre que se acompañe de asistencia técnica y sistemas de monitoreo del suelo.

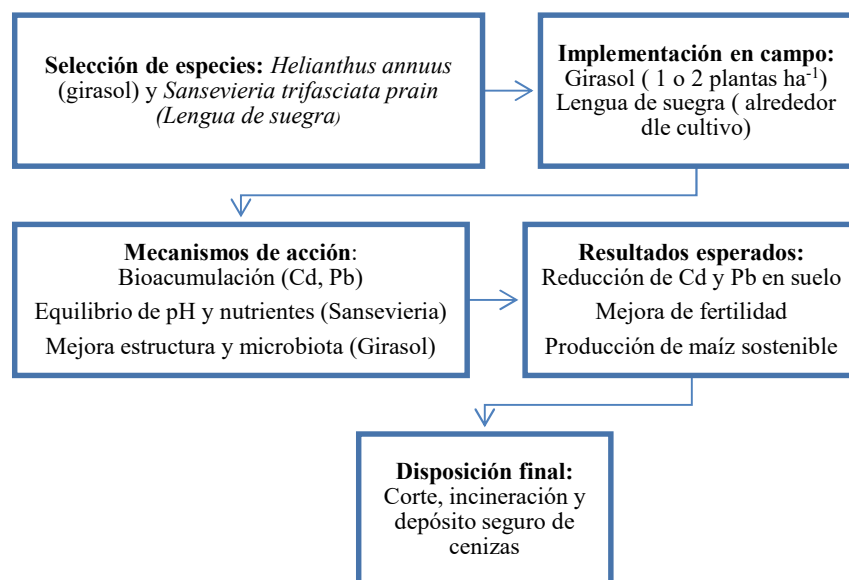


Figura 4. Esquema de estrategia de fitorremediación.
Figure 4. Phytoremediation strategy outline.

Aunque el estudio proporciona resultados relevantes para la caracterización del riesgo ambiental asociado al uso de agroquímicos en sistemas agrícolas de maíz, es importante reconocer ciertos aspectos metodológicos que podrían ser fortalecidos en futuras investigaciones. En esta fase, no se realizaron mediciones instrumentales directas de metales pesados en suelo, por lo que la estimación de contaminación se basó en el uso declarado de plaguicidas y en datos documentales sobre su potencial de contribuir a la acumulación de Cd y Pb (Alloway, 2013). Este enfoque es válido para estudios exploratorios y ha sido aplicado previamente en investigaciones diagnósticas de riesgo agrícola (Ali *et al.*, 2013); sin embargo, se recomienda complementar estas aproximaciones con análisis de laboratorio en etapas posteriores para mejorar la precisión.

De igual manera, la identificación del potencial fitorremediador se sustentó en la presencia observada de especies vegetales y evidencia científica previa, sin ensayos experimentales bajo condiciones controladas. Si bien estos procedimientos son adecuados para establecer una línea base (Ali *et al.*, 2013; Mahar *et al.*, 2016), futuras investigaciones podrían incorporar indicadores cuantitativos como el coeficiente de bioconcentración (BCF) o tasas de translocación, lo que permitiría validar la eficiencia específica de cada especie en suelos locales.

A pesar de estas limitaciones propias de la etapa diagnóstica, el estudio se fortalece por haber utilizado una muestra representativa de productores locales y por la coincidencia de los resultados con tendencias reportadas en contextos agrícolas similares. Esto confirma que los hallazgos son científicamente consistentes y constituyen una base sólida para el diseño de estrategias piloto de fitorremediación adaptadas a la realidad agrícola de la provincia de Los Ríos.

CONCLUSIONES

El uso intensivo de plaguicidas en los procesos agrícolas del cultivo de maíz constituye una de las principales vías de incorporación de metales pesados al suelo, generando riesgos ambientales y potenciales afectaciones a la seguridad alimentaria. La presencia de compuestos a base de plomo, cadmio y otros metales utilizados como estabilizantes o coadyuvantes en fertilizantes, fungicidas, herbicidas e insecticidas provoca su acumulación gradual en los sistemas edáficos, especialmente cuando no se implementan prácticas adecuadas de manejo y disposición de residuos agroquímicos. Esta situación se agrava en zonas de alta actividad agrícola, como el norte de la provincia de Los Ríos, donde el monocultivo repetitivo y la falta de controles ambientales favorecen el incremento de la concentración de contaminantes en el suelo.

Ante este escenario, la fitorremediación representa una alternativa ambientalmente sostenible y de bajo costo para el tratamiento de suelos agrícolas contaminados con metales pesados, ya que aprovecha la capacidad natural de ciertas especies vegetales para absorber, acumular y estabilizar contaminantes.

Entre las especies evaluadas, *Sansevieria trifasciata*, *Helianthus annuus* y *Sorghum bicolor* destacan por su potencial bioacumulador y su adaptabilidad a las condiciones edáficas locales, lo que las convierte en opciones viables para programas de restauración ecológica en la provincia de Los Ríos. El uso de estas especies contribuye no solo a la remediación del suelo, sino también al fortalecimiento de sistemas agrícolas más resilientes y sostenibles, reafirmando la necesidad de integrar estrategias de fitorremediación en las políticas de manejo ambiental y productivo del sector agropecuario ecuatoriano.

A partir de los hallazgos, se recomienda a los agricultores reforzar las buenas prácticas agrícolas mediante la rotación de cultivos, uso responsable de agroquímicos, incorporación de especies vegetales fitorremediadoras en bordes y zonas no cultivadas, así como la gestión adecuada de residuos químicos. Paralelamente, se sugiere a las autoridades locales y entidades ambientales promover programas de capacitación técnica, establecer incentivos para la adopción de prácticas agroecológicas y desarrollar planes territoriales de monitoreo del suelo que integren fitorremediación como estrategia complementaria de gestión ambiental. Estas acciones permitirían avanzar hacia sistemas agrícolas más resilientes y sostenibles, alineados con los objetivos nacionales de seguridad alimentaria y protección ambiental.

DECLARACIÓN DE ÉTICA

No aplicable.

CONSENTIMIENTO PARA PUBLICACIÓN

No aplicable.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

No aplicable.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

FINANCIACIÓN

No aplicable.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización: M.D.P. y R.B.M.; Metodología: R.B.M.; Software: R.B.M.; Validación: X.C.M., N.G.C. y M.D.P.; Análisis formal: M.D.P.; Investigación: R.B.M.; Recursos: X.C.M.; Curación de datos: N.G.C.; Escritura - preparación del borrador original: M.D.P.; Escritura - revisión y edición: X.C.M.; Visualización: R.B.M.; Supervisión: M.D.P.; Administración del proyecto: M.D.P.

AGRADECIMIENTOS

No aplicable.

LITERATURA CITADA

- Alaboudi, K. A., Ahmed, B., & Brodie, G. (2018). Phytoremediation of Pb and Cd contaminated soils using *Helianthus annuus* (sunflower) plants. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(22), 21833-21844. <https://doi.org/10.1016/j.aoas.2018.05.007>
- Ali, H., Khan, E., & Sajad, M. A. (2013). Phytoremediation of heavy metals—Concepts and applications. *Chemosphere*, 91(7), 869-881. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.01.075>
- Alloway, B. J. (2013). *Heavy metals in soils: Trace metals and metalloids in soils and their bioavailability* (3rd ed.). Dordrecht, Netherlands: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-4470-7>
- Anas, M., Khattak, W. A., Sarfraz, W., Khalid, N., Naeem, N., Farid, M., ... & Fahad, S. (2025). EDTA-enhanced phytoextraction: leveraging *Ricinus communis* for the decontamination of Pb and Cd in agricultural soils. *Plant Growth Regulation*, 105(1), 215-228. <https://doi.org/10.1007/s10725-024-01270-7>

- Esparza-Olalla, J. E., Forero-Lugo, F. C., & Mardones-Montanares, M. A. (2020). Uso de organofosforados por agricultores de la comunidad de Guaslán-Ecuador y los cambios hematológicos. *Ciencia y Agricultura*, 17(1), 31-50. <https://doi.org/10.19053/01228420.v17.n1.2020.10603>
- Fei, X., Xiao, R., Christakos, G., Langousis, A., Ren, Z., Tian, Y., & Lv, X. (2019). Comprehensive assessment and source apportionment of heavy metals in Shanghai agricultural soils with different fertility levels. *Ecological Indicators*, 106, 105508. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105508>
- INEC (Instituto Nacional de Estadística y Censos). (2021). *Módulo de Información Ambiental y Tecnificación Agropecuaria (ESPAC 2020): Principales resultados*. Quito, Ecuador: INEC.
- IBM Corporation (2017). *IBM SPSS Statistics for Windows (version 25.0)*. Armonk, NY, USA: IBM Corp.
- Ibrahim, N., & El-Afandi, G. (2020). Phytoremediation models for heavy metal (Pb, Cd, and Zn) uptake using Nerium oleander. *Heliyon*, 6(7), e04391. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04445>
- INEN (Instituto Ecuatoriano de Normalización). (2013). *Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2266:2013. Transporte, almacenamiento y manejo de materiales peligrosos*. Requisitos. Quito, Ecuador: INEN.
- Jeevanantham, S., Saravanan, A., Hemavathy, R. V., Kumar, P. S., Yaashikaa, P. R., & Yuvaraj, D. (2019). Removal of toxic pollutants from water environment by phytoremediation: a survey on application and future prospects. *Environmental Technology & Innovation*, 13, 264-276. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2018.12.007>
- Lewandowski, I., Schmidt, U., Londo, M., & Faaij, A. (2006). The economic value of the phytoremediation function—assessed by the example of cadmium remediation by willow (*Salix ssp*). *Agricultural Systems*, 89(1), 68-89. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2005.08.004>
- Li, X., & Yang, Y. (2020). Preliminary study on Cd accumulation characteristics in *Sansevieria trifasciata* Prain. *Plant Diversity*, 42(5), 351-355. <https://doi.org/10.1016/j.pld.2020.05.001>
- Liu, Z. Q., Li, H. L., Zeng, X. J., Lu, C., Fu, J. Y., Guo, L. J., ... & Jing, H. C. (2020). Coupling phytoremediation of cadmium-contaminated soil with safe crop production based on a sorghum farming system. *Journal of Cleaner Production*, 275, 123002. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123002>
- Mahar, A., Wang, P., Ali, A., Awasthi, M. K., Lahori, A. H., Wang, Q., ... & Zhang, Z. (2016). Challenges and opportunities in the phytoremediation of heavy metals contaminated soils: A review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 126, 111-121. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2015.12.023>
- MAE (Ministerio del Ambiente del Ecuador). (2012). *Acuerdo No. 142. Listado nacional de sustancias químicas peligrosas, desechos peligrosos y especiales*. Quito, Ecuador: Ministerio del Ambiente.
- MAG (Ministerio de Agricultura y Ganadería). (2020). *Resumen ejecutivo de los diagnósticos territoriales del sector agrario*. Quito, Ecuador: Ministerio de Agricultura y Ganadería - Coordinación General de Planificación y Gestión Estratégica.
- Marrero-Coto, J. A. S. (2015). Fitorremediación: Una tecnología que involucra a plantas y microorganismos en el saneamiento ambiental. *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, 49(2), 11-18.
- Patra, D. K., Pradhan, C., & Patra, H. K. (2020). Toxic metal decontamination by phytoremediation approach: Concept, challenges, opportunities and future perspectives. *Environmental Technology & Innovation*, 18, 100672. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.100672>
- Pérez-Moncada, U. A., Ramírez-Gómez, M., Serralde-Ordoñez, D. P., Peñaranda-Rolón, A. M., Wilches-Ortiz, W. A., Ramírez, L., & Rengifo-Estrada, G. A. (2019). Hongos formadores de micorrizas arbusculares (HFMA) como estrategia para reducir la absorción de cadmio en plantas de cacao (*Theobroma cacao*). *Terra Latinoamericana*, 37(2), 121-130. <https://doi.org/10.28940/terra.v37i2.479>
- Qin, G., Niu, Z., Yu, J., Li, Z., Ma, J., & Xiang, P. (2021). Soil heavy metal pollution and food safety in China: Effects, sources and removing technology. *Chemosphere*, 267, 129205. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.129205>
- Roongtanakiat, N., & Chairaj, P. (2001). Uptake potential of some heavy metals by vetiver grass. *Agriculture and Natural Resources*, 35(1), 46-50.
- Shah, V., & Daverey, A. (2020). Phytoremediation: A multidisciplinary approach to clean up heavy metal contaminated soil. *Environmental Technology & Innovation*, 18, 100774. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.100774>
- Sun, J., Pan, L., Tsang, D. C. W., Zhan, Y., Zhu, L., & Li, X. (2018). Organic contamination and remediation in the agricultural soils of China: A critical review. *Science of the Total Environment*, 615, 724-740. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.271>
- Yi, X. U., Liang, X., Yingming, X. U., Xu, Q. I. N., Huang, Q., Lin, W. A. N. G., & Yuebing, S. U. N. (2017). Remediation of heavy metal-polluted agricultural soils using clay minerals: a review. *Pedosphere*, 27(2), 193-204. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(17\)60310-2](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(17)60310-2)
- Zhang, H., Yuan, X., Xiong, T., Wang, H., & Jiang, L. (2020). Bioremediation of co-contaminated soil with heavy metals and pesticides: Influence factors, mechanisms and evaluation methods. *Chemical Engineering Journal*, 398, 125657. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.125657>