

Evaluación del potencial de *Mimosa pudica* para fitorremediación de suelos de residuo minero contaminados con cinc y cobre, en los años 2014 y 2019

Evaluation of the potential of *Mimosa pudica* for phytoremediation of mining waste soils contaminated with zinc and copper, in the years 2014 and 2019

López Hernández, Maybis Eugenia^{1*}

*Morales Hernández, Osman Enrique*²

*Lacayo Romero, Martha Lorena*³

^{1,3} Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Managua, Nicaragua

² Instituto Nicaragüense de Energía-INE, Managua, Nicaragua

¹ mlopezh@unan.edu.ni 

² omorales@ine.gob.ni 

³ mlacayor@unan.edu.ni 

Recibido/received:15/07/2025 Corregido/revised:04/09/2025 Aceptado/accepted:13/12/2025

Resumen: Como alternativa de solución ante la problemática de contaminación por metales pesados en residuos de minería, el presente artículo evalúa la capacidad de la *Mimosa pudica*, planta autóctona de la región central de Nicaragua, para fitorremediar suelos contaminados por cinc y cobre, procedentes de sitios de actividad minera artesanal del municipio de Santo Domingo, departamento de Chontales. Los sitios fueron: El Plantel La Estrella, evaluado en el año 2014; y las Rastras Adonis y Rigoberto Miranda, evaluadas en el 2019. Se colectaron muestras de plantas y su suelo rizosférico para cuantificar parámetros físico-químicos y determinar la concentración de los metales de interés. Los metales totales fueron determinados mediante la técnica de ICP-OES y los resultados, para el Plantel La Estrella (II Muestreo), reflejaron concentraciones de cinc de 177,756 mg.Kg⁻¹ a 437,873 mg. Kg⁻¹, por debajo del valor máximo admisible establecido en la Guía Canadiense, no así el Plantel La Estrella (I Muestreo), Rastra Adonis y Rastra Rigoberto Miranda, con valores superiores al valor comparado. Para cobre, en todos los sitios, se reflejaron concentraciones entre 116,273 mg.Kg⁻¹ a 252,815 mg.kg⁻¹, superior al máximo establecido en la normativa. Al evaluar las concentraciones de cinc y cobre, se logró determinar bioacumulación y traslocación en órganos vegetativos como raíz, tallo, hojas, semilla y flor con factor de bioacumulación y traslocación mayor a uno, demostrando que la planta posee capacidad de tolerar y bioacumular estos metales, pudiendo considerarse para fitorremediación de estos suelos.

Palabras clave: Residuos de minería; zinc; cobre; fitorremediación; metales pesados

* Autor de correspondencia
Correo: mlopezh@unan.edu.ni



Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial-SinDerivar 4.0

Abstract: As an alternative solution to the problem of heavy metal contamination in mining waste, this article evaluates the capacity of *Mimosa pudica*, a native plant of the central region of Nicaragua, to phytoremediate soils contaminated by zinc and copper, from artisanal mining sites in the municipality of Santo Domingo, department of Chontales. The sites were: Plantel La Estrella, evaluated in 2014 on two dates; and Rastra Adonis and Rigoberto Miranda, evaluated in 2019. Plant and rhizosphere soil samples were collected to quantify physicochemical parameters and to determine the concentration of metals of interest. Total metals were determined using the ICP-OES technique and the results for Plantel La Estrella (II Sampling) showed zinc concentrations between 177,756 mg/kg and 437,873 mg/kg, below the maximum permissible value established in the Canadian Guide. However, Plantel La Estrella (I Sampling), Rastra Adonis and Rigoberto Miranda showed values higher than the compared value. For copper, concentrations ranging from 116,273 mg/kg to 252,815 mg/kg were observed at all sites, exceeding the maximum limit established by regulations. When evaluating zinc and copper concentrations, bioaccumulation and translocation were determined in vegetative organs such as roots, stems, leaves, seeds, and flowers, with bioaccumulation and translocation factors greater than one. This demonstrates that the plant has the capacity to tolerate and bioaccumulate these metals, making it suitable for phytoremediation of these soils.

Keywords: Mining waste; zinc; copper; phytoremediation; heavy metals

Introducción

El sector minero en Nicaragua ha venido experimentado un crecimiento significativo a partir del año 2007, tanto en la pequeña minería como en la artesanal y a nivel industrial (MEM, 2025), siendo uno de los rubros de mayor importancia en el país, sin embargo, esta actividad también trae consigo efectos negativos sobre los recursos naturales como el suelo y el agua, esto debido a la contaminación directa por los residuos sólidos y por las altas concentraciones de metales pesados que se generan (Cristaldi *et al.*, 2017). La contaminación de los suelos por metales es una realidad que va en aumento a nivel global, que afecta los servicios ecosistémicos que proporciona este recurso natural, reduciendo su calidad y afectando la inocuidad de los alimentos. Los metales pesados se caracterizan por ser persistentes y son complejos para las diferentes técnicas de remediación y pueden entrar fácilmente a la cadena trófica (Rodríguez-Eugenio, 2019).

El cinc y cobre son micronutrientes del suelo esenciales para el crecimiento de las plantas, no obstante, en altas concentraciones afectan la fertilidad del suelo y pueden causar la muerte de las plantas llegando a ser fitotóxicos (León & Sepúlveda, 2012). Debido a que existen plantas capaces de acumular metales en sus raíces y partes aéreas a través de mecanismos biológicos (López & Morales, 2022), surge el interés para su identificación y estudio en la aplicación en la fitorremediación de metales pesados. Las plantas fitorremediadoras tienen la capacidad de sobrevivir a ambientes contaminados, mediante la incorporación de los metales a su organismo, contribuyendo a la disminución de estos elementos del suelo y permitiendo su recuperación sin afectar sus características físico-químicas, su productividad, y biodiversidad (Shah & Daverey, 2020).

Con base a lo anterior esta investigación se orienta en la caracterización de los suelos de residuo minero y análisis de metales en órganos vegetativos de la *Mimosa pudica*, que permitan determinar su capacidad fitorremediadora para reducir la concentración en suelo, de cinc y cobre, en los sitios de estudio de Santo Domingo Chontales.

Materiales y Métodos

Sitios de estudio: El estudio fue llevado a cabo en la zona minera de Santo Domingo, Chontales, seleccionando sitios con actividad minera artesanal del municipio (Figura 1), los cuales no realizan ninguna práctica para caracterizar el material de desecho ni para su tratamiento o estabilización. Se clasifica como un estudio de tipo descriptivo mediante métodos y técnicas cuantitativas, que caracterizan, mediante comparaciones normativas, los parámetros físicos y químicos de los residuos generados tras la extracción de oro; a su vez es de tipo exploratorio ya que se hizo identificación de vegetación autóctona para selección de plantas de la especie *Mimosa pudica*, que por su adaptación a las condiciones de cada sitio, presentaba interés de estudio para determinar su potencial fitorremediador para extracción de metales pesados del suelo rizosférico.

Las actividades de muestreo *in situ* se efectuaron en el año 2014 y 2019, para caracterización de los suelos de desechos mineros y evaluar el contenido de metales en plantas de cada sitio, respectivo a cada fecha de muestreo. En el Plantel La Estrella se efectuaron dos muestreos en el año 2014; y en 2019, se evaluaron dos rastras, Rastra Adonis y Rastra Rigoberto Miranda. Los resultados de análisis fisicoquímico y de concentración de metales permitieron identificar el mecanismo utilizado por la planta para sobrevivir al ambiente de estrés por presencia de metales pesado en las fechas evaluadas (2014 y 2019).

Figura 1

Localización de los sitios Plantel La Estrella, Rastra Adonis y Rastra Rigoberto Miranda



Fuente: adaptado de INETER (2025) y Google Earth (2025)

Sitios de Muestreo: Las muestras de plantas con sus suelos rizosféricos fueron colectadas por triplicado en los sitios de estudios y utilizando herramientas manuales. La selección entre plantas se basó en criterios

como: especie, abundancia en el sitio y características morfológicas. La colecta se realizó mediante espátulas y palas, conservando su morfología, así como el suelo rizosférico en que coexistía. Posteriormente, las plantas y suelo fueron colocadas en papel craft y bolsas ziploc, respectivamente. Todas las muestras se conservaron en termos con hielo hasta su traslado hacia el laboratorio del Centro de Investigación en Biotecnología (CIB) de la Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua (UNAN-Managua).

Para la preparación de las muestras de plantas se realizó: secado a ambiente, separación según sus partes vegetativas (raíz, tallo, hoja, flor y semilla), Triturado con mortero y pilón, y Almacenamiento en bolsas ziploc, previo a su procesamiento. El suelo fue secado a ambiente y luego tamizado, con tamiz número 30, para posterior análisis.

Análisis de muestras: Los parámetros de interés fueron determinados de acuerdo con métodos de laboratorio estandarizados e indicados en la Tabla 1.

Tabla 1. Metodología aplicada a las muestras de suelo de residuos mineros y planta *Mimosa pudica* para la determinación y cuantificación de cada parámetro.

Parámetro	Método	Equipo utilizado	Referencias
Metales totales en suelo rizosférico: cinc, cobre	Method 200.7: Determination of Metals and Trace Elements in Water and Wastes by Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry	Espectrómetro de Emisión Óptica por Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-OES), marca Agilent Serie 700	U.S. EPA. 1994. "Method 200.7: Determination of Metals and Trace Elements in Water and Wastes by Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry," Revision 4.4. Cincinnati, OH
Metales en plantas: cinc, cobre	Nitric acid digestion and multi-element analysis of plant material by inductively coupled plasma spectrometry B.A. Zarcinas a , B. Cartwright	Espectrómetro de Emisión Óptica por Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-OES), marca Agilent Serie 700	Zarcinas et al., 1987

Fuente: Elaborada por los autores, 2025

Para determinar el nivel de contaminación de los suelos rizosféricos, las concentraciones de los metales fueron comparadas con las guías del Consejo Canadiense de ministros del Ambiente (CCME, 2007), establecidos para protección del medioambiente y la salud humana.

En el cálculo del factor de bioacumulación y factor de traslocación de metales en la planta *Mimosa pudica*, se utilizaron las ecuaciones 1 y 2 descritas por Mganga, (2014) e Iqbal *et al.*, (2020).

$$FBC = \frac{\text{Concentración del metal en la raíz de la planta}}{\text{Concentración del metal en el suelo}} \quad (1)$$

$$FT = \frac{\text{Concentración del metal en las partes de la planta}}{\text{Concentración del metal en la raíz}} \quad (2)$$

El FBC mayor que uno encontrado en la planta puede indicar que posee la capacidad de absorber una concentración más alta de metales que los que están disponibles en el suelo, y un FBC menor que uno, indica que la planta restringe la entrada del metal a sus órganos. Un FT menor que uno indica que la planta puede ser utilizada para estabilizar los metales al inmovilizarlos en las raíces, evitando su traslocación a las partes aéreas de la planta (Aziz *et al.*, 2023).

Resultados y discusión

Concentraciones de cinc y cobre totales en suelos de residuos mineros

Las concentraciones de los metales totales pesados en suelos rizosféricos se muestran en la Tabla 2 y son comparadas con la Guía Canadiense CCME (2007) para suelos de uso agrícola.

Tabla 2. Concentración de metales en suelos rizosféricos y su comparación con normativa

Parámetro	Sitios de Muestreo				CCME, (2019)	Unidades
	P. La Estrella I M, 2014	P. La Estrella II M, 2014	Rastra Adonis, 2019	Rastra Rigoberto M., 2019		
Cinc	225,422	177,756	437,873	244,709	200	mg.kg ⁻¹
Cobre	159,672	116,273	252,815	164,428	63	mg.kg ⁻¹

Fuente: Elaborada por los autores, 2025

Para el cinc se reflejaron concentraciones entre 177,756 a 437,873 mg.kg⁻¹, siendo que el Plantel La Estrella II Muestreo se encuentra por debajo del máximo normado, sin embargo, para el Plantel La Estrella I Muestreo, Rastra Adonis y Rastra Rigoberto Miranda las concentraciones del metal exceden los 200 mg.kg⁻¹.

Se determina que el contenido de cinc se relaciona con el material de origen volcánico de Santo Domingo, tal como refiere Aldana (2016), sobre la geología y litología del área de Santo Domingo, constituida por rocas volcánicas del neógeno mioceno, del subgrupo coyol inferior. En adición, la prolongada actividad minera desarrollada a lo largo del tiempo da lugar a la acumulación del metal, mostrando a su vez, persistencia ante la degradación (Guzmán-Morales, 2024). El contenido de este metal es de importancia y objeto de estudio por los efectos negativos que puede ocasionar en el suelo, plantas y animales, pudiendo interferir en la disponibilidad de micronutrientes esenciales como el hierro y el manganeso (Huu-Tap Van *et al.*, 2024).

El cobre reflejó concentraciones entre 116,273 a 252,815 mg.kg⁻¹, muy por encima de la concentración máxima, de 63 mg.kg⁻¹, de la Guía Canadiense. Estos niveles, al igual que el cinc, tienen origen por formaciones geológicas naturales del material parental de la zona y que, al momento de ser extraídos y procesados para la extracción de metales preciosos, son lavados y expuestos en grandes cantidades para posteriormente ser acumulados a intemperie. La contaminación por cobre es persistente ante procesos naturales de degradación, y aunque se considera esencial para las plantas, a altas concentraciones resulta fitotóxico y de baja movilidad, es decir que no se transporta fácilmente hacia otros sitios, acumulándose principalmente en la capa superficial del suelo (Giovana Poggere, *et al.*, 2023).

Concentraciones de cinc y cobre en órganos vegetativos de Mimosa pudica

En la Tabla 3 se aprecian los resultados del contenido de cinc y cobre en raíz, tallo, hoja, semilla y flor, identificados en las muestras de la planta *Mimosa pudica*. Para el cinc: En raíz se reflejó la mayor concentración en el Plantel La Estrella I Muestreo; en cuanto a las partes aéreas, se reflejó mayor contenido en la flor y hoja, observado en Plantel La Estrella II Muestreo, Rastra Adonis y Rastra Rigoberto Miranda. Esta acumulación de cinc indica que la *Mimosa pudica* es capaz de utilizarlo en sus procesos metabólicos, acumulándolo en sus raíces y translocándolo a sus diferentes partes aéreas. En el sistema suelo planta el cinc contribuye a la activación de enzimas y absorción de nutrientes y agua del suelo (Huu-Tap Van, *et al.*, 2024), por lo que se demuestra que la planta no restringe su acumulación a altas concentraciones en suelos.

El cobre en raíz presentó una mayor acumulación en el Plantel La Estrella durante el II Muestreo, seguido por Rastra Rigoberto Miranda; para las partes aéreas, durante el I Muestreo en Plantel La Estrella se dio mayor acumulación en hoja, y en el resto de los sitios con mayor número de órganos de planta, se distingue una mayor concentración en la flor. Se aprecia que por mecanismos biológicos la planta tolera y logra acumular el metal en todas las partes vegetativas de la *Mimosa pudica Cahuana*, (Cahuana & Aduvire, 2019; Beltran & Gómez, 2016).

Es importante señalar que entre las funciones del cobre en la planta se encuentra la asimilación de CO₂ y la producción del ATP, lo que contribuye a la fotosíntesis (Vinod Kumar *et al.*, 2021), aunque en ambientes con altas concentraciones en la matriz suelo puede resultar perjudicial para su crecimiento (Loyde De La Cruz *et al.*, 2022). De los resultados observados se muestra tolerancia y desarrollo de diferentes órganos

vegetativos de la *Mimosa pudica* aun en condiciones con altas concentraciones de cobre, sin presentar efectos negativos fitotóxicos que restrinjan su crecimiento (Jara-Peña, *et al.*, 2014).

Tabla 3. Concentración de metales en diferentes órganos vegetales de *Mimosa pudica*.

Resultados en mg.kg ⁻¹							
Parámetro	Plantel La Estrella I Muestreo			Plantel La Estrella II Muestreo			
	Raíz	Tallo	Hoja	Raíz	Tallo	Hoja	Flor
Cinc	153,382	33,959	60,602	72,665	65,657	75,951	128,008
Cobre	47,135	5,355	11,485	119,542	41,328	41,634	116,642

Resultados en mg.kg ⁻¹									
Parámetro	Rastra Adonis					Rastra Rigoberto Miranda			
	Raíz	Tallo	Hoja	Semilla	Flor	Raíz	Tallo	Hoja	Flor
Cinc	33,122	54,183	59,278	47,018	57,617	82,562	37,709	69,985	150,129
Cobre	14,283	9,577	15,913	13,496	18,243	70,477	12,372	38,469	56,596

Fuente: Elaborada por los autores, 2025

Factor de bioacumulación (FBC) y traslocación (FT) de cinc y cobre

La Figura 2 muestra los FBC y FT en las diferentes partes vegetales de la *Mimosa pudica*. La planta, para el Plantel La Estrella I Muestreo 2014 obtuvo un FBC y FT menores a 1, tanto para cinc como cobre, presentando menor capacidad bioconcentración de los metales en la raíz referente al suelo e ineficiente traslocación del metal en tallo y hoja referente a la raíz. Para el Plantel la Estrella II Muestreo 2014, la planta bioacumuló cobre en raíz con un FBC de 1 y traslocó el metal desde su raíz a la flor con FT de 1, en cuanto al zinc, reflejó FBC menor que 1 en su raíz, pero los FT fueron de 1 y 1.8 en hojas y flor respectivamente, indicando transporte eficiente a estos órganos aéreos.

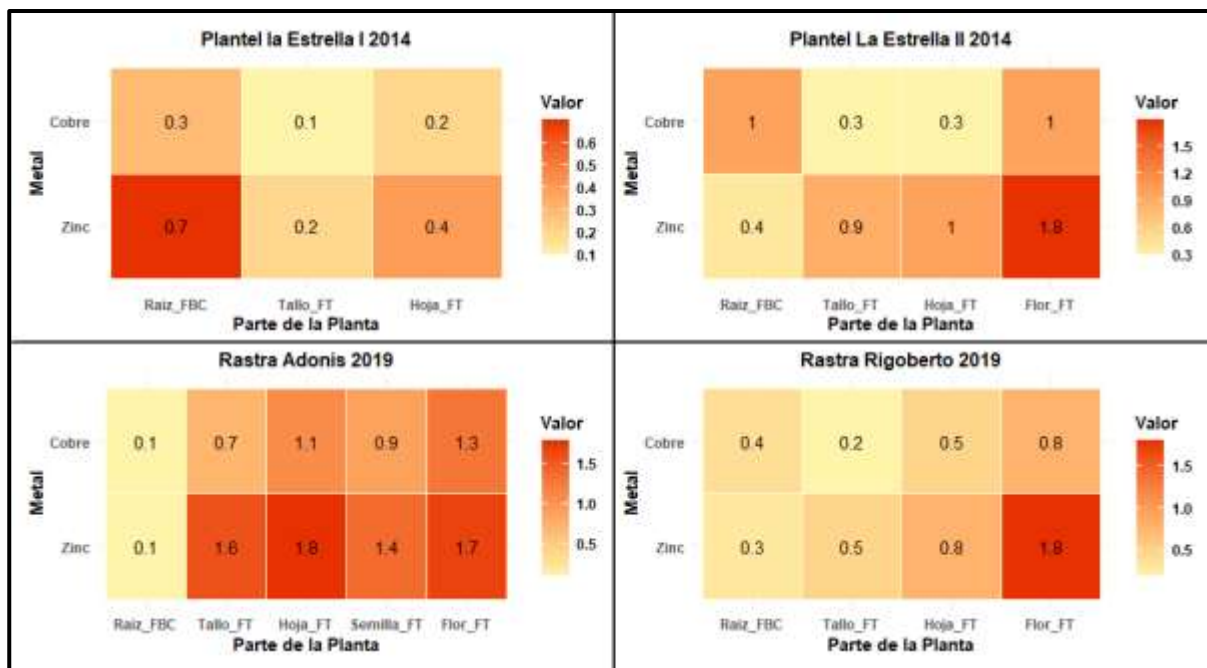
En el caso de Rastra Adonis 2019, para el cobre la *Mimosa pudica* lo bioacumuló con un FBC menor que 1 en raíces, no obstante, con FT de 1.1 y 1.3 muestra haber traslocado el metal en las hojas y flor respectivamente, mostrando eficiencia para la fitoextracción desde la raíz a las partes aéreas. Para el cinc se reflejó un FBC menor que 1 pero un FT de 1.6, 1.8, 1.4 y 1.7, para las partes aéreas tallo, hoja, semilla y flor respectivamente, reflejando capacidad de fitoextracción del metal. La Rastra Rigoberto Miranda, 2019, para el cobre reflejó FBC y FT inferior a 1, con reducida capacidad de bioacumulación y extracción del metal, y para el zinc, un FBC inferior a 1 pero con FT de 1.8 en la flor, mostrando capacidad fitoextractora.

Los resultados obtenidos sugieren que, a lo largo del tiempo, la planta muestra adaptación y desarrollo, siendo más eficiente en la bioacumulación y traslocación de los metales de acuerdo con las condiciones ambientales. Estas características de supervivencia y desarrollo de estrategias ante presencia de altas concentraciones de metales de cinc y cobre indica que la *Mimosa pudica* posee potencial para la fitorremediación, y puede ser usada para inmovilizar y remover el metal del suelo ya que es capaz de formar

complejos de ácidos orgánicos y reducir la movilidad del metal impidiendo su migración (Aziz *et al.*, 2023; Delgadillo-López *et al.*, 2011).

Figura 2

Factores de bioacumulación y traslocación de metales pesados Cobre y Cinc en *Mimosa pudica*



Fuente: Elaborado por los autores, 2025

Conclusiones

La evaluación de metales totales en suelo rizosférico de *Mimosa pudica* determinó que las concentraciones de zinc, al ser comparadas con el valor máximo admisible de 200 mg.kg⁻¹ establecido por la Guía Canadiense, cumple únicamente en el Plantel La Estrella II Muestreo, encontrándose por debajo de la concentración límite. En tanto para el Plantel La Estrella I Muestreo, Rastra Adonis y Rigoberto Miranda, el contenido de cinc superó el valor máximo, reflejando altos niveles de contaminación por este metal. Por otro lado, las concentraciones de cobre al compararse con el límite máximo de 63 mg.kg⁻¹ se encontró que todos los sitios presentan altos niveles de contaminación, por encima del valor guía. Se determina que el contenido de estos metales obedece a la formación geológica del material parental.

Al evaluar las concentraciones de metales en suelo rizosférico con los metales cuantificados en la planta autóctona *Mimosa pudica*, se logró evidenciar bioacumulación del cinc y cobre en raíces y partes aéreas, de las cuales se obtuvo un FBC y FT de 1 en raíz y superiores a 1 en partes aéreas (tallo, hoja, semilla y flor). Se observó mayor eficiencia en traslocación en la Rastra Adonis, posiblemente debido a que en este sitio se reflejaron las mayores concentraciones para ambos metales, que puede relacionar una mayor

biodisponibilidad. Mediante estos resultados se puede aseverar capacidad de la planta, para tolerar las concentraciones de metales de cinc y cobre en el suelo, bioconcentrando en raíz y traslocando en partes aéreas. La planta muestra característica para ser clasificada como bioacumuladora y fitoextractora de estos metales pesados.

Contribución de Autoría CRediT

En el presente estudio, la conceptualización fue llevada a cabo por Martha Lacayo Romero quien propuso la idea del estudio y definió los objetivos de la investigación. La metodología fue diseñada por Martha Lacayo Romero y Maybis López Hernández quien estructuró el proceso de recolección de datos, y Osman Morales Hernández encargado de implementar los modelos de análisis. La implementación del software estuvo a cargo de Osman Morales Hernández, quien desarrolló los scripts necesarios para el análisis de datos y realizó pruebas de validación. La investigación fue desarrollada por Martha Lacayo Romero y Maybis López Hernández quienes realizaron el trabajo de campo y recopilaron las muestras biológicas. Martha Lacayo Romero también fue responsable de gestionar los recursos, asegurando el acceso a laboratorios y equipos necesarios para el estudio.

Maybis López Hernández y Osman Morales Hernández se encargó de la curación de datos, organizando, limpiando y documentando la información recopilada para su análisis y futura reutilización. La redacción del borrador original del manuscrito fue realizada por Maybis López Hernández, mientras que la revisión y edición del documento fue un esfuerzo conjunto entre Martha Lacayo Romero y Osman Morales Hernández quienes revisaron y corrigieron el manuscrito antes de su envío. En términos de liderazgo, Martha Lacayo Romero asumió la supervisión del estudio, proporcionando orientación a los demás autores, además de coordinar el proyecto a través de la administración del mismo. Finalmente, Martha Lacayo Romero también fue el responsable de la adquisición de fondos, gestionando los recursos financieros necesarios para la realización de la investigación.

Declaración de intereses contrapuestos

Maybis López Hernández, Osman Morales Hernández y Martha Lacayo Romero declaramos que no tenemos intereses financieros en conflicto ni relaciones personales conocidas que pudieran haber influido en el trabajo presentado en este artículo.

Declaratoria de uso de inteligencia artificial

Maybis López Hernández, Osman Morales Hernández y Martha Lacayo Romero declaramos que se no se utilizó ninguna herramienta IA para la elaboración de este artículo científico.

Disponibilidad de datos

Los datos generados de la investigación realizada están disponibles en la Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua-Managua/ Centro de Investigación en Biotecnología, correo biotecnologia@unan.edu.ni.

Agradecimientos y financiamiento

A la Agencia Austriaca para la Cooperación Internacional en Educación e Investigación (OEAD), dentro del marco de APPEAR, y en unión con la Universidad de Vienna (UNIVIE) de Austria, la Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo (UNASAM), Perú, a través del proyecto de Biorremediación de Sitios Contaminados: Investigación y Educación (BIOREM); por brindar el financiamiento para la ejecución de la investigación del 2014. UNAN-Managua ya que por medio de los Fondos Para Investigación (FPI), se logró completar la investigación en el 2019. A la Alcaldía de Santo Domingo, Chontales por su valiosa colaboración siendo el enlace entre el Centro de Investigación en Biotecnología y los mineros.

Referencias

- Aziz, R.A.; Yiwen, M.; Saleh, M.; Salleh, M.N.; Gopinath, S.C.B.; Giap, S.G.E.; Chinni, S.V. & Gobinath, R. (2023). Bioaccumulation and Translocation of Heavy Metals in Paddy (*Oryza sativa* L.) and Soil in Different Land Use Practices. *Sustainability* 15, 13426. <https://doi.org/10.3390/su151813426>
- Aldana G. (2016). Caracterización hidrogeológica en la ciudad de Santo Domingo y sus Alrededores. Trabajo monográfico para optar al título de Ingeniera Geóloga, Departamento de Tecnología, Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua. <https://repositorio.unan.edu.ni/id/eprint/3732/1/51721.pdf>
- Beltran, Mayra & Gómez-Rodríguez, Alida. (2016). Biorremediación de metales pesados cadmio (Cd), cromo (Cr) y mercurio (Hg), mecanismos bioquímicos e ingeniería genética: una revisión. *Revista Facultad de Ciencias Básicas*. 12. 172-197. 10.18359/rfcb.2027.
- Cristaldi, A., Conti, G.O., Jho, E.H., Zuccarello, P., Grasso, A., Copat, C., & Ferrante, M. (2017). Phytoremediation of contaminated soils by heavy metals and PAHs. A brief review. *Environmental Technology & Innovation*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eti.2017.08.002>.
- Canadian Council of Ministers of the Environment. (2007). Canadian soil quality guidelines for the protection of environmental and human health: Summary tables. Updated. In: Canadian environmental quality guidelines, 1999, Canadian Council of Ministers of the Environment, Winnipeg.
- Cahuana, Lizardo, & Aduvire, Osvaldo. (2019). Bioacumulación de metales pesados en tejidos de vegetación acuática y terrestre evaluados en áreas donde existen pasivos ambientales mineros en el Perú. *Revista de Medio Ambiente y Minería*, 4(2), 19-36. Recuperado en 10 de diciembre de 2025, de http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2519-53522019000200002&lng=es&tlng=es.
- Delgadillo-López, Angélica Evelin, González-Ramírez, César Abelardo, Prieto-García, Francisco, Villagómez-Ibarra, José Roberto, & Acevedo-Sandoval, Otilio. (2011). Fitorremediación: una alternativa para eliminar la contaminación. *Tropical and subtropical agroecosystems*, 14(2), 597-612. Recuperado en 10 de diciembre de 2025, de

http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-04622011000200002&lng=es&tlng=es.

Giovana Poggere, Amanda Gasparin, Julierme Zimmer Barbosa, George Wellington Melo, Rodrigo Studart Corrêa, Antonio Carlos Vargas Motta. (2023). Soil contamination by copper: Sources, ecological risks, and mitigation strategies in Brazil, *Journal of Trace Elements and Minerals*. Volume 4. 2023. 100059. ISSN 2773-0506. <https://doi.org/10.1016/j.jtemin.2023.100059>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2773050623000149>)

Google Earth (2025). Imágenes satelitales en modelo virtual.

Guzmán-Morales, A. R., González-Viera, D., Cruz-La Paz, O., Valdés-Carmenate, R., Valdés-Hernández, P. A., Mesa-Rebato, S., & Arteaga-Barrueta, M. (2024). Análisis de un suelo agrícola contaminado por cobalto, plomo y zinc. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 33(1), <https://cutid.com/2177/v33n1e04>. Recuperado a partir de <https://revistas.unah.edu.cu/index.php/rcta/article/view/1842>

Huu-Tap Van, Van Hung Hoang, Luong Thi Quynh Nga, Van Quang Nguyen, Effects of Zn pollution on soil: Pollution sources, impacts and solutions, *Results in Surfaces and Interfaces*. (2024). Volume 17.100360. ISSN 2666-8459, <https://doi.org/10.1016/j.rsurfi.2024.100360>.

Iqbal Khan Z., Safdar H., Ahmad K., Wajid K., Bashir H., Ugulu I. and Dogan Y. (2020). Copper bioaccumulation and translocation in forages grown in soil irrigated with sewage water. *Pak. J. Bot.*, 52(1): 111-119. DOI: <http://dx.doi.org/10.30848/PJB2020-1>.

Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales INETER (2025). Mapa de la división política administrativa de Nicaragua. <https://www.ineter.gob.ni/mapa/pub/nicaragua/DPA.html>

Jara-Peña, Enoc, Gómez, José, Montoya, Haydeé, Chanco, Magda, Mariano, Mauro, & Cano, Noema. (2014). Capacidad fitorremediadora de cinco especies altoandinas de suelos contaminados con metales pesados. *Revista Peruana de Biología*, 21(2), 145-154. <https://doi.org/10.15381/rpb.v21i2.9817>

Cahuana, Lizardo, & Aduvire, Osvaldo. (2019). Bioacumulación de metales pesados en tejidos de vegetación acuática y terrestre evaluados en áreas donde existen pasivos ambientales mineros en el Perú. *Revista de Medio Ambiente y Minería*, 4(2), 19-36. Recuperado en 10 de diciembre de 2025, de http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2519-53522019000200002&lng=es&tlng=es.

León Morales, Janet María; Sepúlveda Jiménez, Gabriela. 2012. El daño por oxidación causado por cobre y la respuesta antioxidante de las plantas. *Interciencia, Asociación Interciencia Caracas, Venezuela*. vol. 37, núm. 11, noviembre, 2012, pp. 805-811. ISSN: 0378-1844. <https://www.redalyc.org/pdf/339/33925550003.pdf>

López M. y Morales O. (2022). Fitorremediación de suelos contaminados por metales pesados: una revisión. *Revista de Ciencia y Tecnología El Higo*. Vol. 12. No. 02, pp. 15-28/ diciembre 2022. ISSN-E: 2413-1911. DOI: <https://doi.org/10.5377/elhigo.v12i2.15197>

Loyde De La Cruz, Luis Antonio, González Méndez, Blanca, Cruz Avalos, Ana Martha, & Loredó Portales, René. (2022). Suelos agrícolas y metales pesados, una relación tóxica que se puede

remediar. *Epistemos (Sonora)*, 16(33), 93-98. Epub 19 de mayo de 2023. <https://doi.org/10.36790/epistemos.v16i33.228>

Mganga N. (2014). The Potential of Bioaccumulation and Translocation of Heavy Metals in Plant Species Growing around the Tailing Dam in Tanzania. *International Journal of Science and Technology* Volume 3 No. 1. ISSN: 2049-7318.

Ministerio de Energía y Minas de Nicaragua MEM (2025). Reporte de indicadores mineros al 21 de marzo 2025. <https://www.mem.gob.ni/wp-content/uploads/2025/03/Web-INDICADORES-MINEROS-AL-21-DE-MARZO-2025.pdf>

Prieto Méndez, Judith; González Ramírez, César A.; Román Gutiérrez, Alma D.; Prieto García, Francisco Rodríguez-Eugenio, N., McLaughlin, M. & Pennock, D. 2019. La contaminación del suelo: una realidad oculta. Roma, FAO.

Shah, V., & Daverey, A. (2020). Environmental Technology & Innovation 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>.

U.S. EPA. 1994. "Method 200.7: Determination of Metals and Trace Elements in Water and Wastes by Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry," Revision 4.4. Cincinnati, OH.

Vinod Kumar, Shevita Pandita, Gagan Preet Singh Sidhu, Anket Sharma, Kanika Khanna, Parminder Kaur, Aditi Shreeya Bali, Raj Setia. (2021). Copper bioavailability, uptake, toxicity and tolerance in plants: A comprehensive review, *Chemosphere*, Volume 262, 127810, ISSN 0045-6535, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127810>.

Zarcinas, B. A., Cartwright, B. & Spouncer, L.R. (1987). Nitric acid digestion and multi-element analysis of plant material by inductively coupled plasma spectrometry. *tandfonline*, 131-146. <https://doi.org/10.1080/00103628709367806>.