UNIVERSIDAD ESTATAL AMAZÓNICA
FACULTAD CIENCIAS DE LA TIERRA
CARRERA DE INGENIERÍA FORESTAL

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

TEMA:
"ANÁLISIS DE ESPECIES FORESTALES PROMISORIAS PARA LA FITORREMEDIACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS POR METALES PESADOS DE LA ACTIVIDAD MINERA"

AUTOR(ES):

Alexander David Tapia Sánchez

Kerly Marilyn Trujillo Galeas

DOCENTE - TUTOR:

Dr. Yudel García Quintana PhD

Puyo - Pastaza - Ecuador

2023

UEA
UNIVERSIDAD
ESTATAL AMAZÓNICA

FORMATO 4
APROBACIÓN DE LOS TRABAJOS DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

En el siguiente cuadro se detalla un conjunto de criterios a evaluar con un total de cien (100) puntos.

Criterios	Puntaje	Argumentos de la calificación
1. TÍTULO		
El título es conciso e informativo de la idea principal del escrito. Genera expectativas de lectura que se cumplen.	5.0 / 5	Cumple con los criterios de evaluación
2. RESUMEN		
Entrega información necesaria que oriente al lector a identificar de que se trata la investigación y su relevancia. Incorpora los objetivos, metodología, principales harrazgos y conclusiones.	5.0 / 5	Cumple con los criterios de evaluación
3. INTRODUCCIÓN		
Entrega información sobre temática a tratar. Describe la relevancia del tema dentro de las temáticas de investigación, vinculación y docencia. Presentación del problema y objetivos del problema del artículo de manera clara y concisa.	20.0 / 20	Cumple con los criterios de evaluación
4. MARCO TEÓRICO		
Marco teórico coherente y articulado con los objetivos. Entrega conceptos de términos que son empleados en el estudio. Sustenta el referente conceptual con adecuadas fuentes de autoridad.	15.0 / 15	Cumple con los criterios de evaluación
5. METODOLOGÍA		
Describe el tipo de investigación a desarrollar. Expone con claridad el procesamiento de la información y obtención de los datos. Plantea los criterios de análisis con que se abordo la información.	15.0 / 15	Cumple con los criterios de evaluación

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS		
Entrega los resultados de manera organizada a partir del problema planteado, objetivos específicos, etc. Los cuadros y figuras son pertinentes y estan claramente representados. El texto no repite infromación entregada en los cuadros y figuras.	25.0 / 25	Cumple con los criterios de evaluación
7. CONCLUSIONES		
Las conclusiones deben ser claras y precisas, acorde a los objetivos trazados. Discute, reflexiona sobre los resultados obtenidos.	10.0 / 10	Cumple con los criterios de evaluación
8. REFERENCIAS		
Atiende las normas APA en las citas, fuentes y referencias. Las referencias bibliográficas tienen la fuente en el texto y viceversa.	5.0 / 5	Cumple con los criterios de evaluación
VALORACIÓN TOTAL	100	CIEN

DICTAMEN

Marque la casilla correspondiente a su criterio de evaluación respecto al documento revisado.

Recomendación	Marque con X
Aprobar	X
No Aprobar	
CALIFICACIÓN	100

Atentamente,

Firmado electrónicamente por:
SEGUNDO BOLIER
TORRES NAVARRETE

SEGUNDO BOLIER TORRES NAVARRETE (PAR CIEGO)

Dado en la ciudad de PUYO, a los 12 días del mes de SEPTIEMBRE de 2023

UEA
UNIVERSIDAD
ESTATAL AMAZÓNICA

FORMATO 4
APROBACIÓN DE LOS TRABAJOS DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

En el siguiente cuadro se detalla un conjunto de criterios a evaluar con un total de cien (100) puntos.

Criterios	Puntaje	Argumentos de la calificación
1. TÍTULO		
El título es conciso e informativo de la idea principal del escrito. Genera expectativas de lectura que se cumplen.	5.0 / 5	Si, cumple con las expectativas.
2. RESUMEN		
Entrega información necesaria que oriente al lector a identificar de que se trata la investigación y su relevancia. Incorpora los objetivos, metodología, principales harrazgos y conclusiones.	5.0 / 5	Si, cumple con las expectativas.
3. INTRODUCCIÓN		
Entrega información sobre temática a tratar. Describe la relevancia del tema dentro de las temáticas de investigación, vinculación y docencia. Presentación del problema y objetivos del problema del artículo de manera clara y concisa.	20.0 / 20	Si, cumple con las expectativas Cumple con las recomendaciones sugeridas
4. MARCO TEÓRICO		
Marco teórico coherente y articulado con los objetivos. Entrega conceptos de términos que son empleados en el estudio. Sustenta el referente conceptual con adecuadas fuentes de autoridad.	15.0 / 15	Si, cumple con las expectativas
5. METODOLOGÍA		
Describe el tipo de investigación a desarrollar. Expone con claridad el procesamiento de la información y obtención de los datos. Plantea los criterios de análisis con que se abordo la información.	15.0 / 15	Si, cumple con las expectativas Cumple con las recomendaciones sugeridas, con respecto al tipo y enfoque de la investigación.

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS		
Entrega los resultados de manera organizada a partir del problema planteado, objetivos específicos, etc. Los cuadros y figuras son pertinentes y estan claramente representados. El texto no repite infromación entregada en los cuadros y figuras.	25.0 / 25	Si, cumple con las expectativas Cumple con las recomendaciones sugeridas, se puede ver mayor discusión que apoya a las conclusiones de la investigación.
7. CONCLUSIONES		
Las conclusiones deben ser claras y precisas, acorde a los objetivos trazados. Discute, reflexiona sobre los resultados obtenidos.	10.0 / 10	Si, cumple con las expectativas Cumple con las recomendaciones sugeridas
8. REFERENCIAS		
Atiende las normas APA en las citas, fuentes y referencias. Las referencias bibliográficas tienen la fuente en el texto y viceversa.	5.0 / 5	Si, cumple con los criterios
VALORACIÓN TOTAL	100	CIEN

DICTAMEN

Marque la casilla correspondiente a su criterio de evaluación respecto al documento revisado.

Recomendación	Marque con X
Aprobar	X
No Aprobar	
CALIFICACIÓN	100

Atentamente,

Firmado electrónicamente por:
ANDREA CAROLINA BELTRAN CONLAGO

ANDREA CAROLINA BELTRAN CONLAGO (PAR CIEGO)

Dado en la ciudad de PUYO, a los 11 días del mes de SEPTIEMBRE de 2023

Ouriginal by Turnitin

Firmado electrónicamente por: YUDEL GARCIA QUINTANA

Document Information

Analyzed document	DOCUMENTO FINAL URKUND ALEXANDER Y KERLY.docx (D173295921)
Submitted	2023-08-31 16:47:00
Submitted by	GARCIA QUINTANA YUDEL
Submitter email	ygarcia@uea.edu.ec
Similarity	3%
Analysis address	ygarcia.uea@analysis.urkund.com

Sources included in the report

SA

UNIVERSIDAD ESTATAL AMAZÓNICA / DOCUMENTO PARA URKUND.docx
Document DOCUMENTO PARA URKUND.docx (D142662809)
Submitted by: ygarcia@uea.edu.ec
Receiver: ygarcia.uea@analysis.urkund.com
1

SA

UNIVERSIDAD ESTATAL AMAZÓNICA / EVALUACIÓN DEL POTENCIAL BIOACUMULADOR DE METALES PESADOS DE Piptocoma discolor KEYLA Y DANIELA.docx
Document EVALUACIÓN DEL POTENCIAL BIOACUMULADOR DE METALES PESADOS DE Piptocoma discolor KEYLA Y DANIELA.docx (D159835372)
Submitted by: ygarcia@uea.edu.ec
Receiver: ygarcia.uea@analysis.urkund.com
1

SA

UNIVERSIDAD ESTATAL AMAZÓNICA / DOCUMENTO FINAL DINA Y JUAN PARA URKUND.docx
Document DOCUMENTO FINAL DINA Y JUAN PARA URKUND.docx (D173271393)
Submitted by: ygarcia@uea.edu.ec
Receiver: ygarcia.uea@analysis.urkund.com
3

SA

UNIVERSIDAD ESTATAL AMAZÓNICA / Potencial bioacumulador de metales pesados de especies forestales en la región Amazónica ecuatoriana-BRYAN Y HARO.docx
Document Potencial bioacumulador de metales pesados de especies forestales en la región Amazónica ecuatoriana-BRYAN Y HARO.docx (D159844413)
Submitted by: ygarcia@uea.edu.ec
Receiver: ygarcia.uea@analysis.urkund.com
3

"Análisis de especies forestales promisorias para la fitorremediación de suelos contaminados por metales pesados de la actividad minera"

Alexander David Tapia Sánchez[1]
ad.tapias@uea.edu.ec

Kerly Marilyn Trujillo Galeas[1]
km.trujillog@uea.edu.ec

García Quintana Yudel[2]
ygarcia@uea.edu.ec

Universidad Estatal Amazónica, Facultad de Ciencias de la tierra, Carrera de Ingeniería Forestal

Resumen

La minería ilegal en la Amazonía ecuatoriana es un problema ambiental de preocupación para la población en general, de ahí que la fitorremediación resulta una técnica que utiliza plantas especiales para absorber y acumular metales pesados en sus tejidos. Esta investigación procuró analizar el potencial bioacumulador de especies forestales promisorias: *Aniba riparia* (Nees) Mez (Canelo), *Cedrela odorata* L. (Cedro), *Cordia alliodora* Oken (Laurel), *Croton lechleri* Müll.Arg. (Sangre de drago), *Handroanthus chrysanthus* (Jacq.) S.O,Grose (Guayacán), *Otoba parvifolia* (A.DC.) R.Knuth (Doncel) y *Vochysia leguiana* Mart (Tamburo). Para lo cual se llevó a cabo un muestreo de hojas y suelo, basado en la importancia económica y ecológica de siete especies y se determinó la concentración de metales pesados (manganeso (Mn), cobalto (Co), níquel (Ni) y cadmio (Cd) mediante el espectrómetro de absorción atómica. Se encontraron diferencias significativas en la concentración de metales pesados. Se comprobó que la especie *C. alliodora* mostró la mayor capacidad de absorción de Cd con una concentración de hasta 5,89 mg/kg y la que presentó menor absorción de Co fue *H. chrysanthus*, con una concentración de 12,95 mg/kg. Las especies con mayor factor de bioconcentración (FBC) fueron: *C. alliodora* con valores de 2,16 mg/kg y 0,48 mg/kg, en FBC-Cd y FBC-Mn respectivamente; *V. leguiana* con un valor 1,22 mg/kg en FBC-Ni; las especies *C. lechleri*, *A. riparia* y *H. chrysanthus* tuvieron resultados similares entre ellas, con valores de 0,41 mg/kg, 0,40 mg/kg y 0,39 mg/kg en FBC-Co respectivamente. Estos resultados aportaron información valiosa que facilita comprender las características de cada especie en cuanto a la respuesta de bioacumulación de los diferentes metales pesados, lo que permite su uso como especies fitorremediadoras para suelos contaminados por metales pesados.

Palabras Clave: fitorremediación, metales pesados, minería ilegal, bioacumulación, suelo.

Abstract

Illegal mining in the Ecuadorian Amazon is an environmental concern for the general population. Therefore, phytoremediation emerges as a technique that utilizes specialized plants to absorb and accumulate heavy metals in their tissues. This research aimed to analyze the bioaccumulation potential of promising forest species: Aniba riparia (Nees) Mez (Canelo), *Cedrela odorata* L. (Cedar), *Cordia alliodora* Oken (Laurel), *Croton lechleri* Müll.Arg. (Dragon's Blood), *Handroanthus chrysanthus* (Jacq.) S.O. Grose (Guayacán), *Otoba parvifolia* (A.DC.) R.Knuth (Doncel), and *Vochysia leguiana* Mart (Tamburo). For this purpose, a sampling of leaves and soil was conducted based on the economic and ecological significance of these seven species. The concentration of heavy metals (manganese (Mn), cobalt (Co), nickel (Ni), and cadmium (Cd)) was determined using atomic absorption spectrometry. Significant differences were found in the concentration of heavy metals. It was observed that the *C. alliodora* species exhibited the highest Cd absorption capacity, with a concentration of up to 5,89 mg/kg, while *H. chrysanthus* showed the lowest Co absorption, with a concentration of 12,95 mg/kg. Species with higher bioconcentration factors (BCF) included: *C. alliodora* with values of 2,16 mg/kg and 0,48 mg/kg for BCF-Cd and BCF-Mn, respectively; *V. leguiana* with a value of 1,22 mg/kg for BCF-Ni. The species *C. lechleri*, *A. riparia*, and *H. chrysanthus* exhibited similar results, with values of 0,41 mg/kg, 0,40 mg/kg, and 0,39 mg/kg for BCF-Co, respectively. These results provided valuable information that enhances the understanding of each species' characteristics in terms of their bioaccumulation response to different heavy metals. This understanding supports their use as phytoremediation species for soils contaminated by heavy metals.

Keywords*:* phytoremediation, heavy metals, illegal mining, bioaccumulation, soil.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad existen estudios involucrados en resolver la contaminación que se origina a causa de los metales pesados presentes en el sistema del suelo y las plantas, por medio de estrategias basadas en el uso de plantas que posean el potencial de acumular metales pesados como parte del proceso de la fitorremediación para la neutralización de compuestos orgánicos, inorgánicos y radioactivos que resulten tóxicos en las áreas contaminadas (Rodríguez-Ortiz et al., 2006). La principal causa de esta contaminación resulta por el incremento de la actividad minera, debido a la desaceleración económica mundial, donde cada vez es más necesario el uso de los recursos minerales, ocasionando una elevada contaminación del suelo por metales pesados, los cuales no pueden ser disminuidos o destruidos fácilmente de manera natural o biológica, ya que no cumplen funciones metabólicas específicas para los seres vivos (Abollino et al., 2002).

La contaminación del hábitat por metales pesados se ha convertido en un problema grave que ha degradado los suelos y tejidos foliares de las especies vegetales. Algunas técnicas como el lavado del suelo tienen un impacto negativo en la actividad, estructura y

fertilidad del suelo, mientras que otras tienen altos costos de ingeniería por lo que existe la necesidad de efectuar sistemas rápidos y accesibles que puedan predecir con fiabilidad las concentraciones de estos elementos en el suelo y sobre esta base fomentar el uso de técnicas de biorremediación para la restauración de sitios contaminados, acudiendo a la fitorremediación in situ como una novedosa tecnología para la estabilización, remediación, recuperación parcial del suelo, mantenimiento de la actividad biológica y el potencial para mantener las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo por la contaminación de los metales pesados. Numerosos puntos importantes en este proceso deben ser elucidados, entre los que se incluyen la biodisponibilidad de los metales pesados en el suelo y el papel de los microorganismos asociados a las plantas que crecen en estos sitios. (García & Reyes, 2009). Emplear plantas capaces de resistir niveles elevados de metales pesados en suelos y aguas ayuda en la recuperación de zonas contaminadas con un impacto ambiental reducido en comparación con enfoques convencionales más invasivos, que a menudo conllevan efectos secundarios no deseables (Robinson et al., 1997).

La minería se ha convertido en un punto estratégico para la economía de varios países, a tal punto en el que grandes empresas mineras llevan a cabo inversiones en países latinoamericanos potentados en recursos naturales o minerales. Diversas empresas mineras han acudido al Ecuador con el objetivo de extraer y exportar estos recursos, donde países desarrollados en tecnología para la minería como Canadá y Australia son los principales países interesados en aprovechar estos recursos que el Ecuador posee (Benavides, 2022).

La minería de oro a pequeña escala ha ido en aumento notablemente a nivel regional de la Amazonía ecuatoriana a causa de la subida de su precio en el mercado internacional (Jacka, 2018), causando potencialmente daño a la naturaleza llevando consigo la degradación ambiental y el descenso de la salud de los seres vivos (Mestanza-Ramón et al., 2022), resultando alterada por la contaminación directa de los desechos tóxicos, por múltiples compuestos químicos como: ácidos, cianuro, sales de ácido cianhídrico, mercurio (Hg), cobre (Cu), plomo (Pb), zinc (Zn), arsénico (As), selenio (Se), cadmio (Cd), bismuto (Bi), entre otros, que al no ser empleados adecuadamente ocasionan daños al ecosistema (Peña et al., 2020), producto de las prácticas mineras, situación que ha contaminado el agua de los ríos y el medio ambiente en general, vulnerando los derechos de las personas de los pueblos aledaños al sitio intervenido por la actividad minera, provocando su desplazamiento forzado a causa de quienes realizan esta acción (López, 2023).

La minería artesanal de oro en la región amazónica, se desarrolla principalmente en las riberas de los ríos, como sucede el caso en los ríos de la provincia de Napo donde se ha dado lugar a la explotación de este material de forma artesanal debido a la alta presencia de oro, realizando operaciones con plantas de procesamiento situadas cerca de los ríos, acarreando una serie de impactos negativos en el ambiente a causa de la deforestación de los bosques primarios, el asentamiento de comunidades sin los servicios de saneamiento, la procreación de efluentes, emisiones atmosféricas y residuos sólidos contaminantes (Ledesma, 2023).

Las actividades de minería artesanal respecto a las concesiones mineras en la comunidad “El Capricho” dentro del cantón Carlos Julio Arosemena Tola de la provincia de Napo, se llevan a cabo sin ningún tipo de consideración socio-ambiental e intervenciones técnicas especializadas en el tema, causando efectos perjudiciales al entorno ocasionando la pérdida de la flora y la fauna en el lugar (Soria-Maldonado et al., 2022).

Por consecuente, la presente investigación procura analizar el potencial bioacumulador de especies forestales promisorias (*Aniba riparia* (Nees) Mez (Canelo), *Cedrela odorata* L. (Cedro), *Cordia alliodora Oken* (Laurel), *Croton lechleri* Müll.Arg. (Sangre de drago), *Handroanthus chrysanthus* (Jacq.) S.O,Grose (Guayacán), *Otoba parvifolia* (A.DC.) R.Knuth (Doncel) y *Vochysia leguiana* Mart (Tamburo)) para la fitorremediación de suelos contaminados por metales pesados; (manganeso (Mn), cobalto (Co), níquel (Ni) y cadmio (Cd) de la actividad minera) de la actividad minera.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El área de estudio se encuentra en la zona limítrofe entre las localidades de Carlos Julio Arosemena Tola y Santa Clara, en la ribera del río Pinlloyacu, en la proximidad de la comunidad de El Capricho, con coordenadas geográficas 1°16'60" S, 77°28'0" W. En este lugar, se encuentra registrada una concesión minera que se encuentra en la fase de exploración-explotación, bajo la denominación de 'El Capricho' (Figura 1).

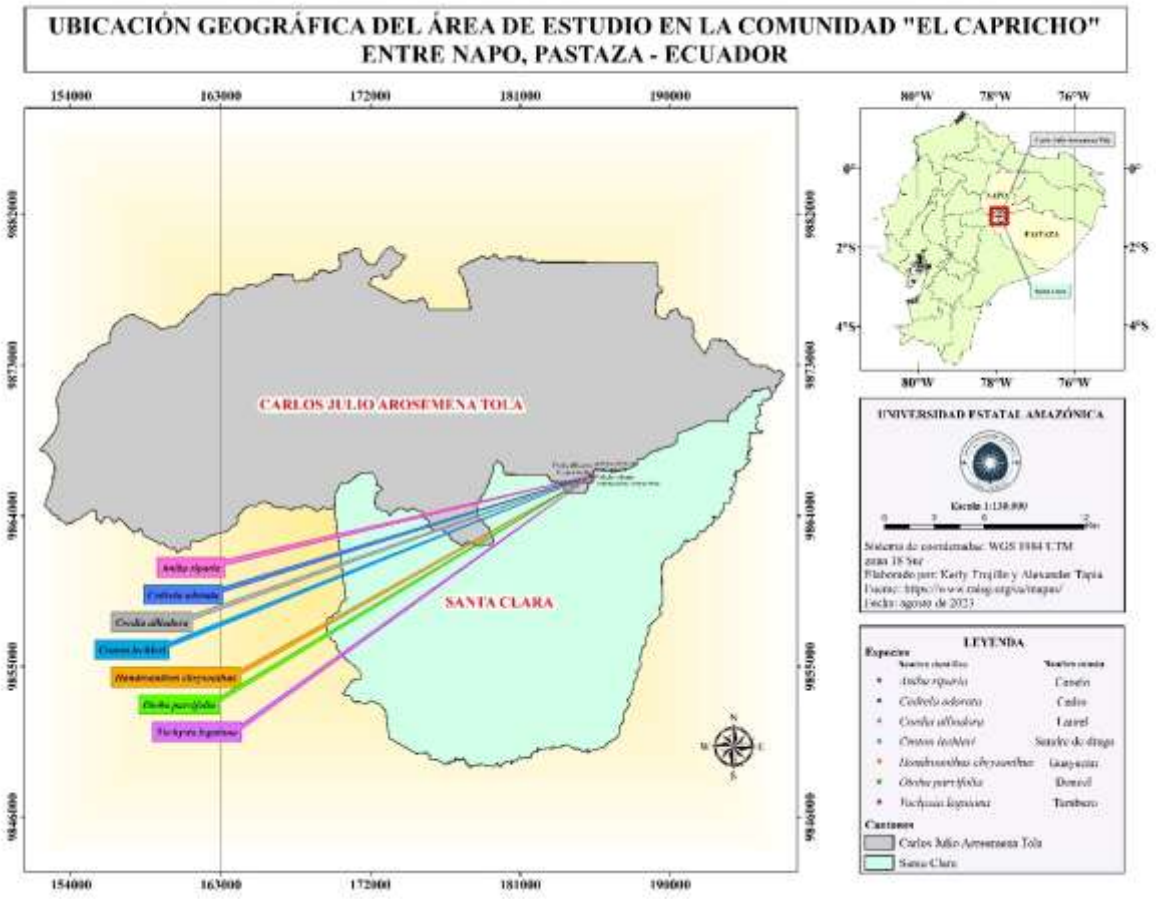

Figura 1. *Ubicación geográfica del área de estudio en la comunidad "El Capricho" entre los límites de las provincias de Napo y Pastaza-Ecuador. Ubicación geográfica de las especies: Aniba riparia, Cedrela odorata, Cordia alliodora, Croton lechleri, Handroanthus chrysanthus, Otoba parvifolia y Vochysia leguiana, a orillas del río Pinlloyacu, Napo-Pastaza.*

Tipo de investigación.

Para este trabajo se utilizaron los tipos de investigación descriptiva, correlacional y aplicada.

Según (Babbie, 2016) la investigación descriptiva se centra en describir y medir las variables y fenómenos tal como son, sin manipularlos o intentar establecer relaciones de causa y efecto. El propósito de la investigación descriptiva es crear descripciones precisas y detalladas de hechos, situaciones, personas, grupos o instituciones con el fin de estudiar su comportamiento actual y obtener información sobre sus características o estado en un momento dado. Este tipo de investigación ayudó a interpretar fenómenos con base en la información objetiva de las muestras recopiladas de siete especies forestales en zonas degradadas por la minería ilegal; la descripción fue en función a la absorción de metales

pesados.

Asimismo, se aplicó la investigación correlacional con el propósito de medir la relación entre variables, se estableció la concentración de metales pesados y la relación entre lo que absorben las especies en las hojas y el suelo mediante la matriz de correlación de Pearson y de este modo conocer la conexión entre las variables analizadas (Mejía, 2017).

También, con el tipo de investigación aplicada se busca resolver los problemas de la degradación de suelos por polución de metales pesados usando plantas bioacumuladoras de metales pesados, además de otros beneficios y servicios ecosistémicos que pueden brindar.

El enfoque empleado en esta investigación fue el enfoque cuantitativo porque se definió en términos cuantitativo la concentración de metales pesados absorbidos por las plantas.

Muestreo

El muestreo se lo llevó a cabo en los lugares antes mencionados, con base en criterios específicos tales como: especies forestales con categoría de ingreso monetario e importancia ecológica; para con ello se escogieron siete especies las cuales fueron: *(C. odorata, C. alliodora, H. chrysanthus, V. leguiana, A. riparia, O. parvifolia, C. lechleri).* Se precisó la colaboración de un técnico local con conocimientos de las distintas especies de árboles y plantas que se encuentran por la zona para la identificación botánica de las especies y de igual manera se validó las especies fichadas en el campo por medio de bibliografías con información de especies nativas de la Amazonía (Palacios, 2016) y en las distintas plataformas sobre plantas por medio de la web.

Se describió las características dasométricas promedio de las diferentes especies en estudio (Tabla 1), cabe mencionar que el muestreo se realizó en un bosque joven de sucesión donde las especies se encuentran en fase de crecimiento.

Tabla 1. *Características dasométricas promedio de las especies muestreadas para este estudio.*

Especies	Altura (h)	Diámetro (DAP) (1,30m)	Edad (años)
Aniba riparia	1,6 m	5,0 cm	4
Cedrela odorata	2,6 m	4,2 cm	4
Cordia alliodora	3,0 m	6,0 cm	4
Croton lechleri	2,5 m	4,1 cm	4
Handroanthus chrysanthus	2,0 m	4,0 cm	4
Otoba parvifolia	3,1 m	7,0 cm	4
Vochysia leguiana	1,7 m	3,0 cm	4

***Fuente**: Elaboración propia.*

Para recolectar material vegetativo de manera no contaminante se utilizaron tijeras de poda y se cortaron ramas nuevas y maduras de plantas saludables y vigorosas, evitando la contaminación de las hojas. Para obtener muestras de suelo, se marcó un radio de 0,30 m alrededor de cada planta seleccionada y se utilizó un barreno para alcanzar una profundidad de 0,30 m. Esta técnica se aplicó para ubicar posibles metales móviles afectados por procesos

como la lixiviación. Posteriormente, las muestras se recogieron en un recipiente profundo, permitiendo separar hojarasca y parte de las raíces mediante un proceso de entreverado (Gold et al., 2004; Zuckerman et al., 1985).

Para las muestras colectadas de material vegetal como las hojas y suelo de cada planta se usaron distintos códigos en cada una de las bolsas donde se las selló, etiquetó con el nombre común de la planta, con sus respectivas coordenadas geográficas para proceder al laboratorio a realizar los distintos ensayos químicos y analizar el contenido de metales pesados requeridos como son: Mn, Co, Ni y Cd. (Mesa et al., 2015; Wang et al., 2019)

- ***Tratamiento de muestras en laboratorio***

Se realizó el preprocesamiento del material vegetal recolectado, enjuagando las partes constitutivas con agua corriente y lavándolas tres veces con agua destilada antes de secarlas en una estufa a 60°C durante 72 horas. Posteriormente, se molieron en un mortero ágata y se trituraron en un molinillo de paletas para obtener partículas de menos de 2 mm. (Wang et al., 2019).

- ***Ensayos químicos***

La mineralización o digestión de las muestras se puede llevar a cabo de dos maneras distintas. En nuestro caso se realizó mediante el método de digestión en húmedo, que implica la descomposición de las muestras mediante la utilización de ácidos, ya sea de forma individual o combinada, en un sistema de alta presión. Esto se logra utilizando recipientes herméticamente cerrados que se calientan en un horno de microondas o una autoclave. En ciertos casos (Belete et al., 2014; Nowrouzi et al., 2014).

Este sistemas cerrado y controlado tienen un vínculo con sistemas de naturaleza abierta, involucrando la disminución de la polución y también la minimización de la pérdida del componente analizado, además de aumentar el umbral de temperatura de ebullición del ácido, lo cual resulta en una digestión más eficiente y rápida. (Operacz et al., 2022)

La Universidad Estatal Amazónica cuenta con un laboratorio de "Bromatología" equipado con un "ETHOS™ One High Performance Microwave Digestion System". Este sistema de microondas está diseñado para preparar muestras con fines analíticos en entornos de laboratorio. La técnica de digestión por microondas implica calentar muestras en un entorno sellado utilizando microondas controlados, lo que acelera su descomposición y mejora la preparación para el análisis (Suquila et al., 2019). Este dispositivo utiliza 12 recipientes TFM (Teflón Fluor Modificado) de 50 ml para llevar a cabo la descomposición ácida de diferentes tipos de muestras. Esto garantiza un control exhaustivo de todos los factores de reacción y cumple con estrictas normas de seguridad y calidad según las pautas establecidas (House, 2019). Además, logra una alta eficiencia en el proceso. Se aplicó con éxito la descomposición a muestras de suelo y tejido vegetal. Tras la descomposición, se preparó una solución utilizando peróxido de hidrógeno (H_2O_2) y ácido nítrico concentrado (HNO_3) para llenar un matraz aforado de 1 l. También se creó una solución de lavado con peróxido de hidrógeno (H_2O_2) y ácido nítrico (HNO_3). Para validar la efectividad de la descomposición, se llevaron a cabo tres repeticiones de análisis en cada muestra.

- ***Procedimiento de descomposición de tejido vegetal y muestras de suelo:*** **ETHOS™ One High Performance Microwave Digestion System.**

En una balanza analítica se pesó 0,5 gramos de cada una de las muestras trituradas y secas de material vegetal y suelo (Tóth et al., 2016), se tomaron cantidades de 0,5 gramos y se colocaron en contenedores de teflón utilizando una pipeta graduada con pera incorporada. Luego, se añadieron con precaución 7 ml de Ácido nítrico (HNO_3) al 65% y 1 ml de Peróxido de hidrógeno (H_2O_2) al 30% en cada envase de material vegetal, y 10 ml de Ácido nítrico al 65% en las muestras de suelo. Después de sellar herméticamente los recipientes, se transfirió cuantitativamente el contenido desde los envases numerados, empezando por el número 2 y terminando en el número 1, teniendo en cuenta la ubicación del termómetro del microondas. Estos 12 contenedores se dispusieron en el horno de microondas, que opera a 800 Watts y alcanza hasta 170 °C. Tras cerrar la tapa y sellar la puerta, se mantuvo el proceso durante un tiempo predefinido hasta que la temperatura llegó a 40 °C. Entonces, los envases se extrajeron en el mismo orden en que se colocaron.

Se ventilaron gases residuales introduciendo envases en la cámara de evacuación. Se prepararon y numeraron 12 vasos y matraces de 25 ml. La mezcla del matraz de 1L se transfirió con precaución a vasos y matraces. Se lavaron minuciosamente 12 envases cilíndricos de 2 onzas y se etiquetaron. Muestras envasadas y etiquetadas se refrigeraron. Vasos y matraces limpios se secaron en estufa tras exhaustiva limpieza.

- ***Evaluación de los cuatro metales: Cadmio (Cd), Níquel (Ni), Cobalto (Co) y Manganeso (Mn):*** Se extrajeron las 12 muestras de la refrigeración a 6 °C y se filtraron en vasos de precipitados secos con papel filtro de marca "Whatman". Luego del proceso de filtración, se midió la cantidad de metales utilizando un espectrómetro de absorción atómica ("Atomic Absorption Spectrometer" o ASS), y los resultados se expresaron en mg/kg en relación al peso en seco de las muestras**.** (Carrión et al., 2012; Zhong et al., 2016).

- ***Coeficiente de Bioacumulación:*** Para analizar la efectividad de la captación de metales pesados (Hosseini Beinabaj et al., 2023), se procedió a integrar la presencia de metales en el suelo y en las especies forestales seleccionadas, y se determinó el potencial de acumulación de elementos o compuestos (Wei et al., 2011), (Factor de bioacumulación) utilizando la siguiente expresión matemática (Ecuación 1).

$$\mathrm{BAF} = \frac{\mathrm{C\ follaje}}{\mathrm{C\ suelo}}$$

Donde:

- BAF es Factor de Bioacumulación.
- $C_{follaje}$ es la concentración del metal contaminante en el follaje.
- C_{suelo} es la concentración del metal contaminante en el suelo.

Como punto importante un espécimen vegetal para ser considerado acumulador excepcional su BAF o Factor bioacumulador debe ser igual o mayor a 1 mg/kg. (Aisien et al., 2010)

- ***Propiedades Físicas de las muestras de suelo.***

Según el método de calcinación. En el laboratorio de suelos; para la obtención del porcentaje de la materia orgánica se procedió a pesar en la balanza analítica el crisol; a ello se le agregó y sumó 5 gramos de muestras de suelo de cada especie forestal, consecutivamente fueron introducidas en la estufa a una temperatura determinada de 105 °C en un lapso de 06 horas (Dabadie et al., 2018), en el siguiente paso se las dejo enfriar, para después ser trasladadas a una mufla durante 03 horas a una temperatura establecida de 300 °C para poder tomar los datos y sus respectivas réplicas.

Para obtener el porcentaje de materia orgánica se aplicó la Ecuación 2:

$$\%\mathrm{MO}=\frac{(\text{peso } 105°\mathrm{C} - \text{peso } 300°\mathrm{C}).100}{\text{peso } 105°\mathrm{C}}$$

- ***Propiedades Químicas de las muestras de suelo.***

Se utilizó el método de potenciometría para medir el pH. Se tomaron 10 gramos de cada muestra y se agregaron 25 ml de H_2O. Tras agitar a 400 Rpm durante 5 minutos, se dejaron reposar las muestras durante 30 minutos. Se calibró el pHmetro y se midieron los iones de hidrógeno en todas las muestras. Se registraron los datos de cada lectura. Hay que destacar que se limpió la membrana de cristal después de cada registro de datos. (Ferreira et al., 2015).

Procesamiento estadístico de los datos

Análisis de varianza (ANOVA)

El análisis de varianza (ANOVA) a nivel foliar posibilitó evidenciar la diferenciación de letras, lo que indicó la existencia de diferencias significativas en los resultados de los análisis de los cuatro metales pesados: manganeso (Mn), cobalto (Co), níquel (Ni) y cadmio (Cd), en las especies: *A. riparia, C. odorata, C. alliodora, C. lechleri, H. chrysanthus, O. parvifolia y V. leguiana*.

Se generó una matriz de correlación de Pearson a partir de datos paramétricos para explorar las interconexiones entre diferentes metales en el nivel foliar y del suelo. Los valores en la matriz oscilan entre 0 y 1, siendo valores más cercanos a 1 indicativos de una mayor correlación entre los metales como se evidencia en la (Tabla 2). Se realizó una agrupación de elementos mediante un análisis de clúster y se utilizó un gráfico circular para interpretar los resultados cabe mencionar que este proceso se basó en un umbral de similitud del 50%. Se aplicó un análisis de componentes principales (ACP) para determinar el número óptimo de componentes y visualizar la distribución de especies en función de las

concentraciones de metales pesados en el suelo y tejido foliar (Lax et al., 2017). Este método permitió identificar y representar la separación o agrupación de las especies según sus niveles de metales pesados en los dos tipos de muestras analizadas. Para los cálculos estadísticos se requirió el uso de "Microsoft Excel."

Tabla 2. *Cuadro de interpretación de la magnitud del coeficiente de la correlación de Pearson.*

Rango de valores de r_{xy}	Interpretación
$0{,}50 \leq \lvert r_{xy} \rvert < 1{,}00$	Correlación fuerte
$0{,}30 \leq \lvert r_{xy} \rvert < 0{,}50$	Correlación moderada
$0{,}10 \leq \lvert r_{xy} \rvert < 0{,}30$	Correlación débil
$0{,}00 \leq \lvert r_{xy} \rvert < 0{,}10$	Correlación muy débil

Fuente: (Hernández et al., 2018)

Bioacumulación de metales pesados en siete especies forestales promisorias (*A. riparia, C. odorata, C. alliodora, C. lechleri, H. chrysanthus, O. parvifolia y V. leguiana.*).

Los resultados estadísticos se presentaron mediante el uso de gráficos de caja (Amjad et al., 2023). Además, con el propósito de facilitar la comprensión de las abreviaciones utilizadas en los análisis gráficos, se creó un glosario organizado en formato de tabla; esto permitió una mayor claridad en la interpretación de los términos empleados en los gráficos y, por ende, una comprensión más efectiva de los hallazgos (Tabla 3).

Tabla 3. *Glosario de términos para comprender los metales examinados. [(manganeso (Mn), cobalto (Co), níquel (Ni) y cadmio (Cd)] tejido foliar (F), suelo (S), factor de bioconcentración (FBC)*

Breviarios	Definición	Breviarios2	Definición3
Mn-F	Manganeso foliar	Mn-S	Manganeso suelo
Co-F	Cobalto foliar	Co-S	Cobalto suelo
Ni-F	Níquel foliar	Ni-S	Níquel suelo
Cd-F	Cadmio foliar	Cd-S	Cadmio suelo
FBC-Mn	Factor de bioconcentración en Manganeso	FBC-Ni	Factor de bioconcentración en Níquel

FBC-Co	Factor de bioconcentración en Cobalto	FBC-Cd	Factor de bioconcentración en Cadmio

Fuente: *Elaboración propia.*

Bioacumulación de los cuatro metales pesados: manganeso (Mn), cobalto (Co), níquel (Ni) y cadmio (Cd), en las siete especies forestales: *A. riparia, C. odorata, C. alliodora, C. lechleri, H. chrysanthus, O. parvifolia* y *V. leguiana*.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis de varianza (ANOVA) a nivel foliar.

El análisis de varianza (ANOVA) a nivel foliar permitió evidenciar que existieron diferencias significativas ($p \leq 0,05$) entre la concentración de metales pesados en las especies de estudio, lo cual se comprobó mediante la diferenciación de letras en los gráficos, lo que indicó la desigualdad significativa de los metales pesados: (Ni-F), (Mn-F) y (Co-F), al contrario de (Cd-F) que fue similar en las especies *C. lechleri* y *A. riparia*. Los resultados mostraron una mayor capacidad de absorción de (Cd-F) en *C. alliodora* con una concentración de hasta 5,89 mg/kg, y semejanzas en la concentración entre las especies *C. lechleri* con 2,04 mg/kg y *A. riparia* con 1,93 mg/kg. La mayor concentración de (Ni-F) se presentó en *A. riparia* con un valor medio de 31,11 mg/kg, (Mn-F) en *O. parvifolia* con 121,11 mg/kg y (Co-F) en *C. alliodora* con 19,7 mg/kg. Los valores más bajos se presentaron en (Cd-F) para *O. parvifolia* con 1,43 mg/kg, (Ni-F) en *C. lechleri* con 24,43 mg/kg, (Mn-F) en *C. lechleri* con 12,03 mg/kg y (Co-F) en *H. chrysanthus* con 12,95 mg/kg (Figura 2).

Estos valores se encontraron dentro del rango permisible para (Mn) según (García Izquierdo et al., 2002) el cual señala el rango óptimo de 20 a 700 mg/kg y en (Cd) un rango de 0,1 a 2,4 donde la especie *O. parvifolia* con 1,43 mg/kg se encontró dentro del rango óptimo. Al contrario de los análisis de (Ni) con un rango de 1 a 5 y en (Co) un rango <1, lo que indicó rangos inadmisibles al resultar tóxicos para las especies del área de estudio. Considerando que las especies estudiadas se encuentran en un bosque joven de sucesión que oscilan los 4 años, con un diámetro y altura óptimos para el estado de desarrollo de las especies mostraron capacidad de absorción de los metales pesados, lo que podría indicar que a futuro sean especies que sigan aportando a la fitorremediación del área contaminada.

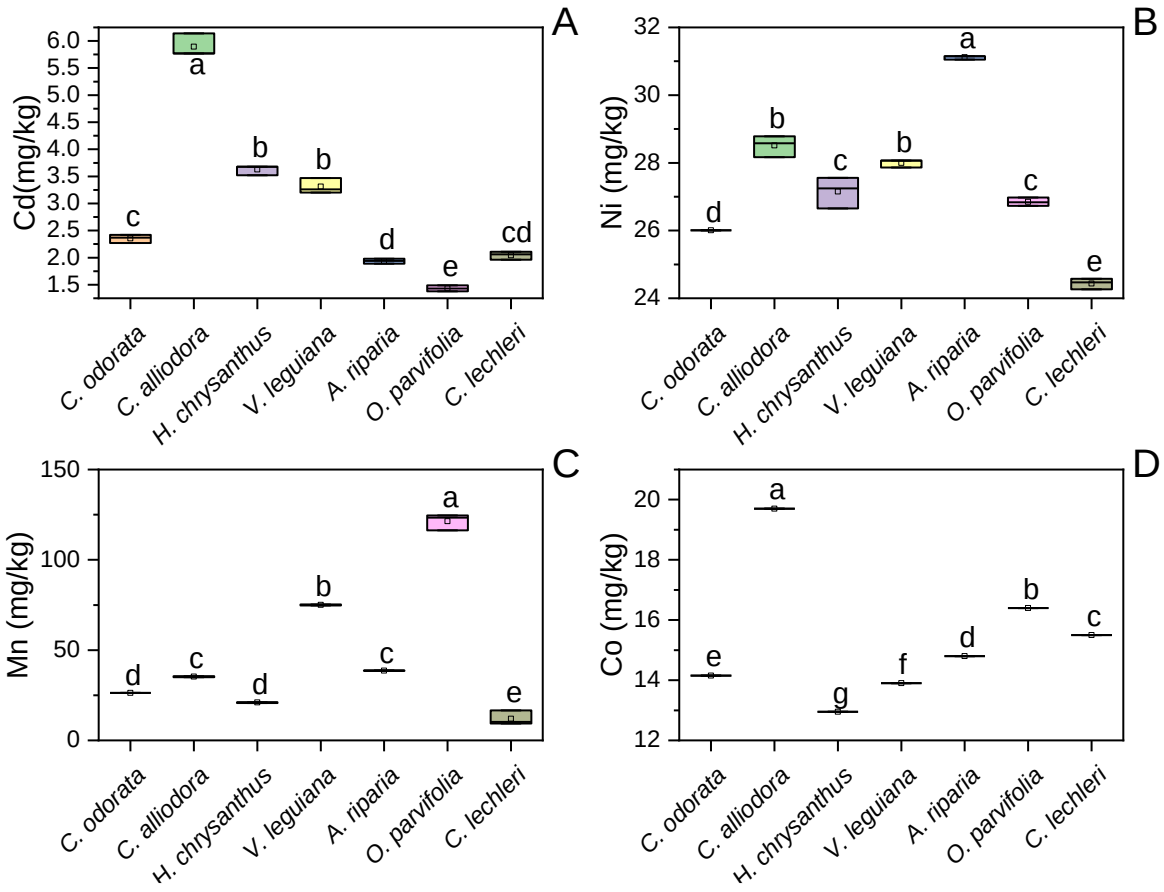

Figura 2. *Valores medios del análisis foliar de la concentración de metales pesados de las especies: Aniba riparia, Cedrela odorata, Cordia alliodora, Croton lechleri, Handroanthus chrysanthus, Otoba parvifolia y Vochysia leguiana a partir del ANOVA y prueba de Tukey con un nivel de significación del 95% de confiabilidad. (A) Cadmio (Cd); (B) Níquel (Ni); (C) Manganeso (Mn) y (D) Cobalto (Co).*

Análisis de varianza (ANOVA) a nivel del suelo.

El análisis de varianza ANOVA a nivel del suelo reveló diferencias significativas ($p \leq 0,05$) entre la concentración de metales pesados en las especies estudiadas, donde se evidenció la diferenciación de letras en los gráficos, indicando la desigualdad significativa en el metal (Mn-S), mientras que en (Cd-S), (Co-S) y (Ni-S) se observó una semejanza en la capacidad de acumulación entre algunas de las siete especies estudiadas. De manera general, los resultados que demostraron una mayor capacidad de absorción de los cuatro metales se le atribuye a *C. odorata*, en (Cd-S) con 11,70 mg/kg, en (Mn-S) con 1116,83 mg/kg, en (Co-S) con 48,1 mg/kg y en (Ni-S) con 82,60 mg/kg. Mientras que los valores más bajos en (Cd-F) con 2,73 mg/kg y (Mn-F) con 73 mg/kg los presentó *C. alliodora*, en (Co-F) con 23,81 mg/kg y (Ni-F) con 22,78 mg/kg se presentaron en *V. leguiana* (Figura 3).

(Barthwal et al., 2008), señala que el nivel de absorción de metales es mayor en el suelo que en las partes de las plantas. El presente estudio corrobora la información tomando como ejemplo a la especie *C. odorata* en los análisis de (Mn), (Co), (Ni) y (Cd) con los valores más altos que oscilaron de 11,70 mg/kg a 1116,83 mg/kg a nivel del suelo y a nivel foliar presentó los valores más bajos de 2,35 mg/kg a 26,3 mg/kg.

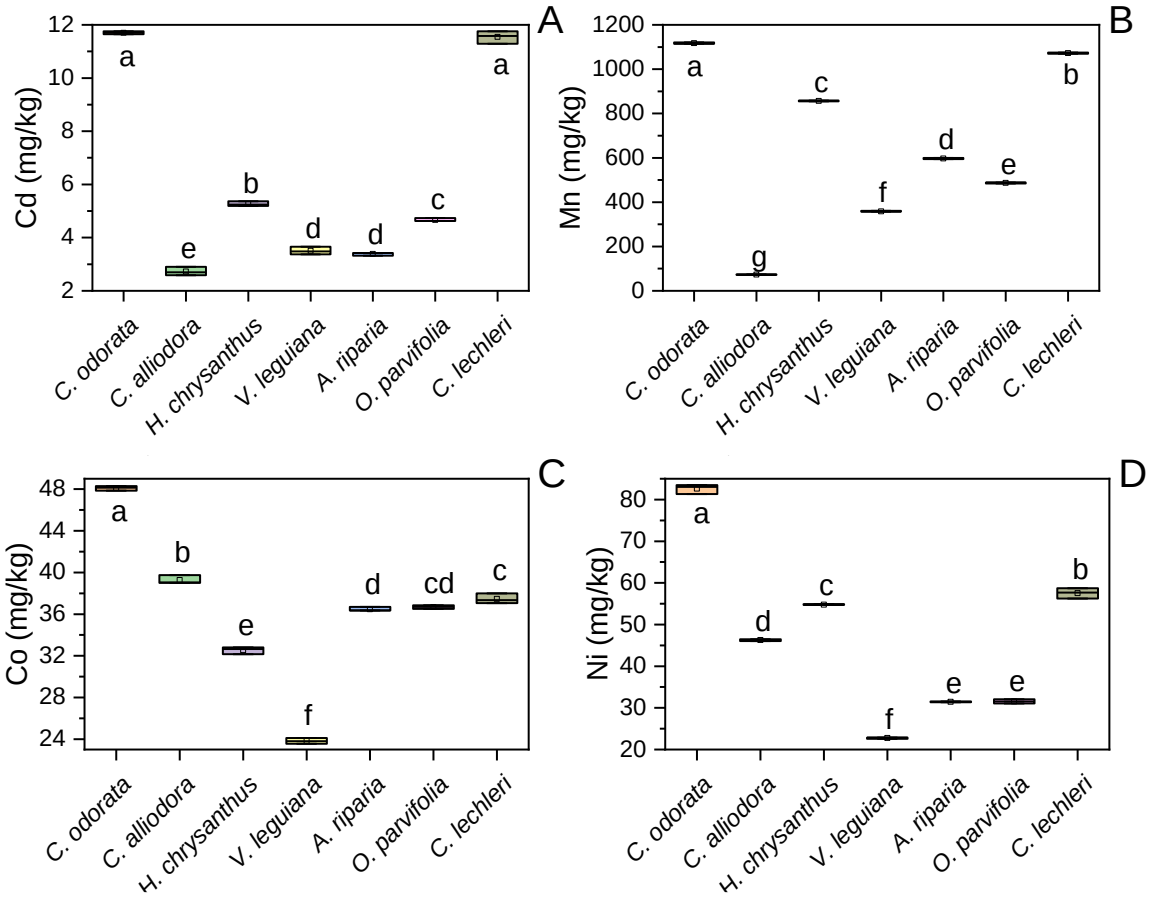

Figura 3. *Valores medios del análisis de suelo de la concentración de metales pesados de las especies: Aniba riparia, Cedrela odorata, Cordia alliodora, Croton lechleri, Handroanthus chrysanthus, Otoba parvifolia y Vochysia leguiana a partir del ANOVA y prueba de Tukey con un nivel de significación del 95% de confiabilidad. (A) Cadmio (Cd); (B) Níquel (Ni); (C) Manganeso (Mn) y (D) Cobalto (Co).*

Análisis del Factor de Bioconcentración (FBC).

La eficiencia de la acumulación de los metales pesados (Mn, Co, Ni y Cd), en cada una de las siete especies analizadas, se calculó mediante el factor de bioconcentración (FBC), donde se pudo constatar que los valores más altos se reportaron en el (FBC-Cd) con 2,16

mg/kg y (FBC-Mn) con 0,48 mg/kg en *C. alliodora,* el (FBC-Co) con 0,58 mg/kg y (FBC-Ni) con 1,22 mg/kg en *V. leguiana,* mientras que los valores más bajos fueron en el (FBC-Ni) con 0,31 mg/kg y (FBC-Co) con 0,29 mg/kg en *C. odorata*, el (FBC-Cd) con 0,17 mg/kg y (FBC-Mn) con 0,01 mg/kg en *C. lechleri.* Estos resultados denotan el potencial bioacumulador de cada una de las especies como base fundamental para identificar especies promisorias para la fitorremediación de metales pesados (Figura 4).

(Acosta, 2016), menciona que una especie bioacumuladora está relacionada con el factor de bioconcentración en donde debe presentar valores mayores a 1 mg/kg. Mediante los resultados presentados en este estudio se pudo constatar que la especie *C. alliodora* en el análisis de (FBC-Cd) presentó 2,16 mg/kg y *V. leguiana* en el (FBC-Ni) presentó 1,22 mg/kg, considerándolas como especies bioacumuladoras.

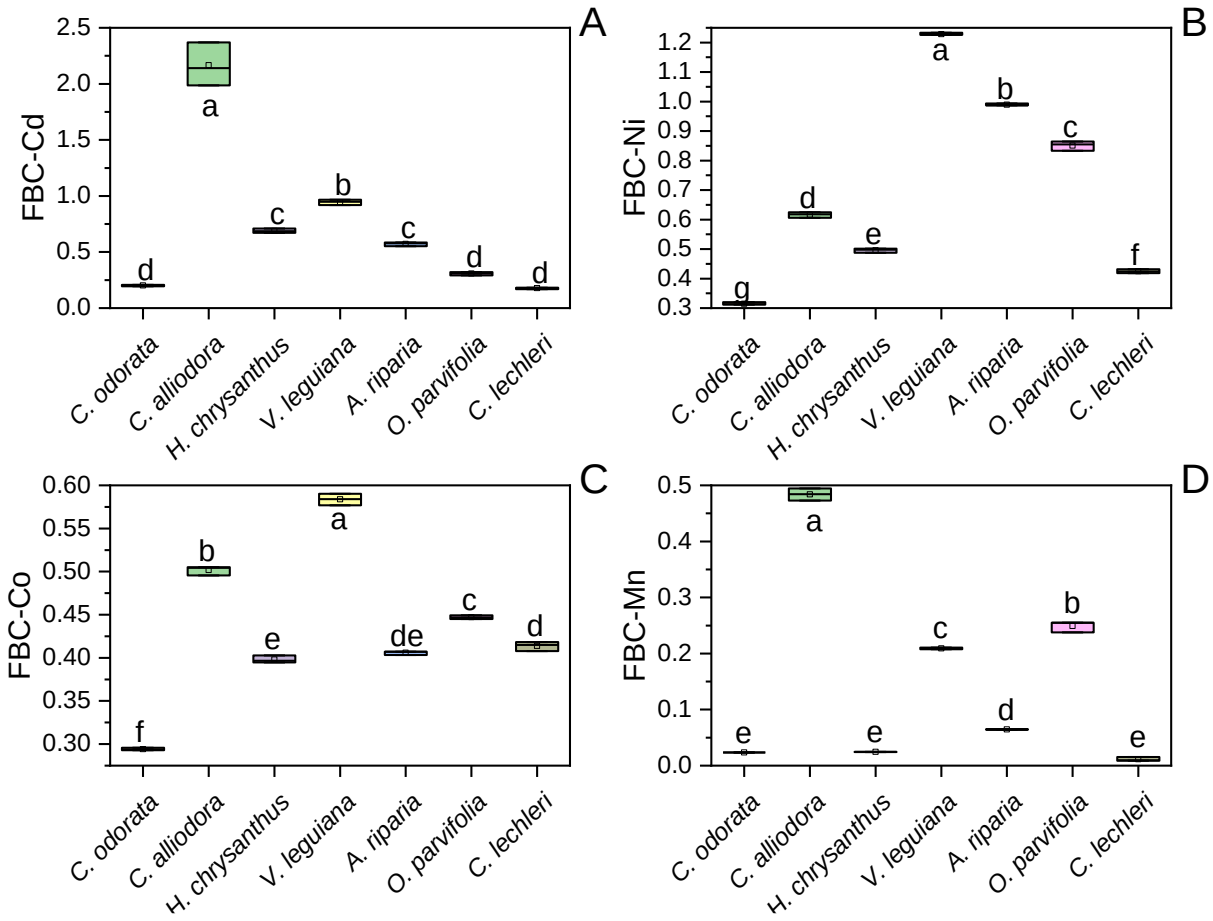

Figura 4. *Valores medios del análisis del factor de bioconcentración de metales pesados de las especies: Aniba riparia, Cedrela odorata, Cordia alliodora, Croton lechleri, Handroanthus chrysanthus, Otoba parvifolia y Vochysia leguiana a partir del ANOVA y prueba de Tukey con un nivel de significación del 95% de confiabilidad. (A) Cadmio (Cd); (B) Níquel (Ni); (C) Manganeso (Mn) y (D) Cobalto (Co).*

Coeficiente de correlación de Pearson

La correlación existente entre los metales pesados analizados a nivel foliar, suelo y el factor de bioconcentración evidenció valores que oscilan de 0 a 1, presentando un color rojo más intenso a medida que el valor se acercó a 1, indicando que la correlación es más fuerte, mientras que la intensidad del color disminuyó indicó una correlación más débil. Por otra parte, a mayor intensidad del color azul se observó valores significativos y negativos que expresaron una relación inversa entre las variables.

Los resultados indicaron que existe una correlación de valor positivo con el 27% en Co-F y Co-S de (r = 0,27) interpretándose como una correlación débil, de igual manera se evidenciaron correlaciones negativas débiles y muy débiles superiores al 40%, siendo débiles en Cd-F y Cd-S de (r = -0,42), Mn-F y Mn-S de (r = -0,48) y muy débiles en Ni-F y Ni-S de (r = -0,57). Esto reveló que existe una baja correlación en los metales pesados en las siete especies, a nivel del suelo y en la parte foliar. El análisis de pH a nivel del suelo constató una relación fuerte, con el 93% y valor positivo con Ni-S (r = 0,93). La materia orgánica a nivel del suelo (MO-S) resultó con un 73% y valor positivo de (r = 0,73) con Mn-S, lo cual reflejó una correlación fuerte. Además, en el análisis del factor de bioconcentración se encontraron valores positivos altos superiores al 43% en los análisis a nivel foliar, en el FBC-Cd con Cd-F de (r= 0,93), FBC-Ni con Mn-F y Ni-F de (r = 0,62), FBC-Co con Mn-F de (r= 0,44), FBC-Mn con Co-F de (r= 0,84), indicando que existe una buena correlación del factor de bioconcentración con la concentración de metales pesados a nivel foliar, al contrario de los análisis a nivel del suelo que presentaron valores negativos donde el FBC-Mn con Co-S resultó en un 12%, siendo el valor más bajo (r= -0,12) (Figura 5).

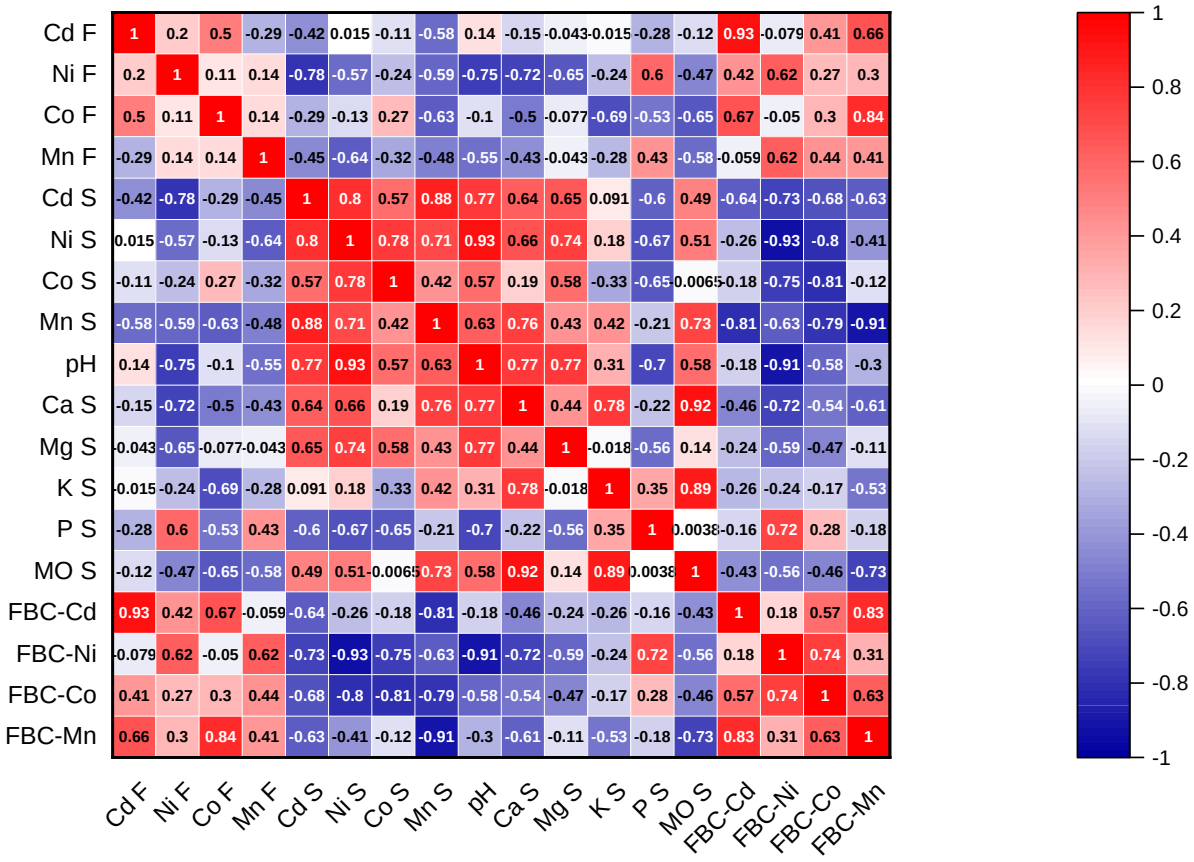

Figura 5. *Matriz de correlación de Pearson entre los metales pesados: manganeso (Mn), cobalto (Co), níquel (Ni) y cadmio (Cd) a nivel del suelo, tejido foliar, pH, materia orgánica y factor de bioconcentración.*

Análisis de Clúster

A partir del análisis de clúster se reportaron cinco grupos con colores diferenciados; en función de la concentración de los metales pesados (Mn, Co, Ni, Cd) en el tejido vegetal de las siete especies estudiadas. El primer grupo se conformó por la concentración de Mn con las especies *O. parvifolia* y *V. leguiana*. El segundo grupo por las concentraciones de Mn y Ni, en material vegetal de *A. riparia, C. alliodora, C. lechleri, V. leguiana, O. parvifolia, H. chrysanthus y C. odorata.* En el tercer grupo se encontró la concentración de Cd en las especies *C. alliodora, H. chrysanthus, V. leguiana, O. parvifolia, C. lechleri, A. riparia y C. odorata.* En el cuarto grupo se presentaron las concentraciones de Co y Mn en las especies *H. chrysanthus, C. alliodora, C. lechleri, O. parvifolia, A. riparia, V. leguiana, C. odorata.* Estas agrupaciones contribuyeron a la categorización de las especies en función de su habilidad para acumular metales pesados, lo que facilita información clave para la identificación de especies promisorias con potencial para ser consideradas como fitorremediadoras en zonas afectadas por la actividad minera (Figura 6).

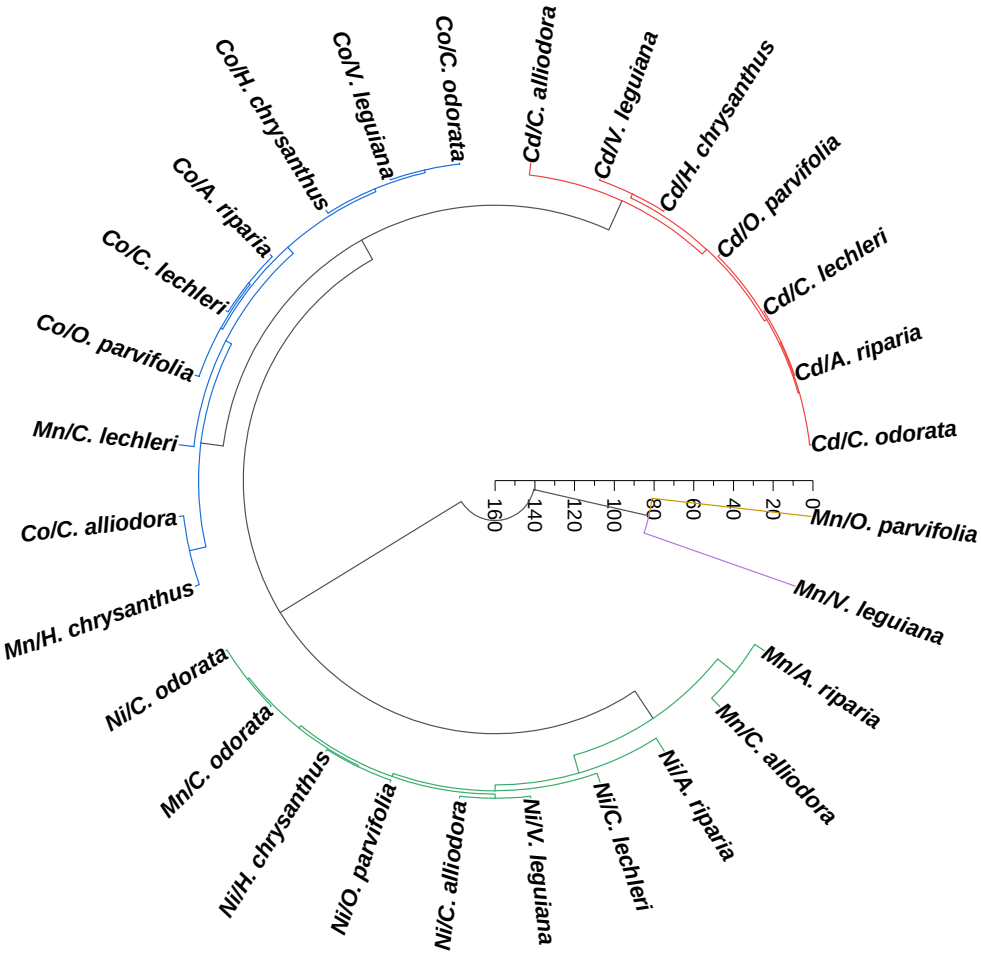

Figura 6. *Análisis de Clúster con agrupaciones establecidas a partir de las concentraciones de los metales pesados: manganeso (Mn), cobalto (Co), níquel (Ni) y cadmio (Cd) en las hojas de las especies: Aniba riparia, Cedrela odorata, Cordia alliodora, Croton lechleri, Handroanthus chrysanthus, Otoba parvifolia y Vochysia leguiana (colores iguales significan la formación de grupos relacionados con la capacidad de acumular los metales pesados analizados).*

Análisis de componentes principales (ACP)

El análisis de componentes principales (ACP) indicó la formación de dos componentes principales. El componente principal 1 (PC1) representó un 57,78% y el componente principal 2 (PC2) representó un 20,70% de la variabilidad, lo que explicó el 78,48% de la variabilidad total de los datos obtenidos de la matriz. En el lado positivo del eje 1 en el sistema de coordenadas se ubicaron las especies *H. chrysanthus, C. odorata* y *C. lechleri,* caracterizadas por poseer una mayor concentración de Ni y Co en el suelo. En el eje 1 negativo no se evidenció la presencia de ninguna especie. En el eje 2 del extremo positivo se comprobó la posición de la especie *C. alliodora* siendo capaz de poseer una mayor concentración de Cd y Co a nivel foliar. En el eje 2 negativo se encontraron las especies *A.*

riparia, V. leguiana y O. parvifolia con concentraciones mayores de Ni y Mn a nivel foliar (Figura 7). Estos resultados demostraron la reducción de la dimensionalidad de los datos, lo que facilitó información para seleccionar especies promisorias para su uso como fitorremediadora en suelos contaminados por los metales pesados mencionados.

En un experimento bajo condiciones controladas (Ortiz-Cano et al., 2009), menciona que la planta de quelite (*Amaranthus hybridus)* fue propensa a incrementar la concentración de Cd a medida que su edad aumentaba en situaciones donde no se agregaban hongos micorrizas al sustrato. Esta tendencia puede estar relacionada con la formación de moléculas bioquímicas durante el metabolismo de la planta. Este proceso podría derivar del Cd, metal cuya característica es sustituir otros iones metálicos y ser incorporado de manera ágil en distintos tejidos de la planta.

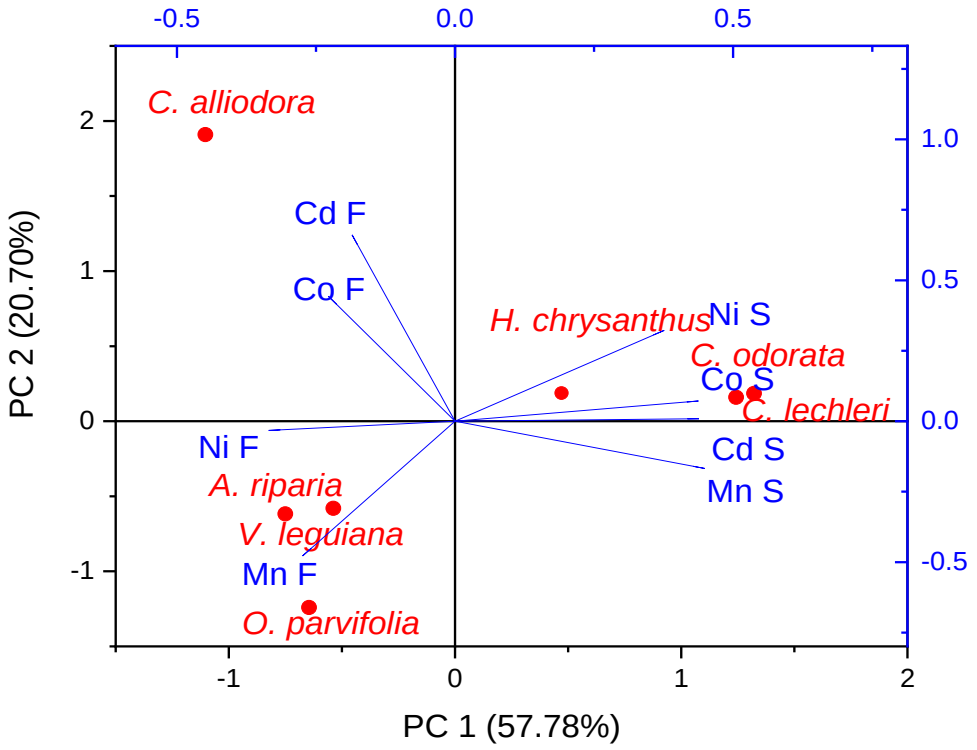

Figura 7. *Análisis de componentes principales de la concentración de metales pesados: manganeso (Mn), cobalto (Co), níquel (Ni) y cadmio (Cd) en hojas y suelos de las especies: Aniba riparia, Cedrela odorata, Cordia alliodora, Croton lechleri, Handroanthus chrysanthus, Otoba parvifolia y Vochysia leguiana.*

4. CONCLUSIONES

El análisis de varianza ANOVA y prueba de Tukey permitió evidenciar que el nivel de

absorción de metales es mayor en el suelo que en las hojas de las plantas, donde la especie *C. odorata* sobresalió en los análisis de (Mn), (Co), (Ni) y (Cd) con valores que oscilaron de 11,70 mg/kg a 1116,83 mg/kg a nivel del suelo y a nivel foliar de 2,35 mg/kg a 26,3 mg/kg.

La matriz de correlación de Pearson resultó con valores positivos y negativos, indicando que existe una baja correlación en los metales pesados en las siete especies, a nivel del suelo y la parte foliar. Esto pudiera estar asociado a la capacidad de bioacumulación de las diferentes especies, considerando necesario este criterio para su uso como especies fitorremediadoras.

Los análisis realizados han destacado claramente las especies que exhibieron un desempeño sobresaliente en la concentración de metales pesados a nivel foliar, suelo y en el factor de bioacumulación. De ahí que las especies *C. alliodora*, *A. riparia* y *C. odorata*, demostraron un marcado potencial como hiperacumuladoras. Estas plantas muestran una prometedora utilidad en aplicaciones de fitorremediación para abordar la contaminación de suelos por metales pesados, especialmente en contextos vinculados a la actividad minera, por lo que se sugiere su uso como especies promisorias para esta finalidad.

REFERENCIAS

Abollino, O., Aceto, M., Malandrino, M., Mentasti, E., Sarzanini, C., & Barberis, R. (2002). Distribution and mobility of metals in contaminated sites. Chemometric investigation of pollutant profiles. *Environmental Pollution*, *119*(2). https://doi.org/10.1016/S0269-7491(01)00333-5

Acosta, M. A. (2016). *Plantas hiperacumuladoras de metales pesados*. All You Need Is Biology.

Aguirre, N., Günter, S., & Bernd, S. (2006). Mejoramiento de la propagación de especies forestales nativas del bosque montano en el Sur del Ecuador. *Unpublished*, *Figura 1*.

Aguirre-Mendoza, Z. H., Loja, C. Á. F., Solano, A. C., & Aguirre, M. N. (2016). *Especies forestales más aprovechadas del sur del Ecuador*. Universidad Nacional de Loja Loja. https://www.researchgate.net/publication/299761463

Aisien, F. A., Faleye, O., & Aisien, E. T. (2010). Phytoremediation of heavy metals in aqueous solutions. *Leonardo Journal of Sciences Issue*, *17*(17).

Amjad, N., Akhtar, I., Hameed, A., Ahmad, F., Ali, F., Ahmad, M., Ullah, I., Bibi, U., Altaf, N., Sanaullah, & Ahmad, U. I. (2023). Phytoremediation of copper and arsenic contaminated soil using gladiolus (Gladiolus grandifloras) and chrysanthemum (Chrysanthemum morifolium) plants. *Asian Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, *9*(2). https://doi.org/10.9734/ajsspn/2023/v9i2177

Babbie, E. (2016). The practice of social research, 14th edition. In *Teaching Sociology*.

Barthwal, J., Nair, S., & Kakkar, P. (2008). Heavy metal accumulation in medicinal plants collected from environmentally different sites. *Biomedical and Environmental Sciences, 21*(4). https://doi.org/10.1016/S0895-3988(08)60049-5

Belete, T., Hussen, A., & Rao, V. M. (2014). Determination of concentrations of selected heavy metals in cow's milk: Borena Zone, Ethiopia. *Journal of Health Science, 4*(5).

Benavides, S. M. E. (2022). *Vulneración de derechos del buen vivir y derechos de la naturaleza por actividades mineras ilegales, en la parroquia Buenos Aires provincia Imbabura*. https://dspace.uniandes.edu.ec/handle/123456789/15259

Betancur, L. M. A., Mazo, K. I. M., & Mendoza, A. J. S. (2005). Fitorremediación: la alternativa para absorber metales pesados de los biosólidos. *Revista Lasallista de Investigación, 2*(1), 57–60. http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=69520110

Carrión, C., León Ponce-de, C., Cram, S., Sommer, I., Hernández, M., & Vanegas, C. (2012). Aprovechamiento potencial del lirio acuático (Eichhornia crassipes) en xochimilco para fitorremediación de metales. *Agrociencia, 46*(6).

Dabadie, M., Perez, C., Arturi, M., Goya, J., & Sandoval, M. (2018). Calibración del método de pérdida de peso por ignición para la estimación del carbono orgánico en Inceptisoles del NE de Entre Ríos. *Revista de La Facultad de Agronomia, La Plata*, *117*(1).

Ferreira, E. C., Gomes Neto, J. A., Milori, D. M. B. P., Ferreira, E. J., & Anzano, J. M. (2015). Laser-induced breakdown spectroscopy: extending its application to soil pH measurements. *Spectrochimica Acta - Part B Atomic Spectroscopy*, *110*. https://doi.org/10.1016/j.sab.2015.06.002

Gafur, N. A., Sakakibara, M., Komatsu, S., Sano, S., & Sera, K. (2022). Environmental Survey of the Distribution and Metal Contents of Pteris vittata in Arsenic–Lead–Mercury-Contaminated Gold Mining Areas along the Bone River in Gorontalo Province, Indonesia. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *19*(1). https://doi.org/10.3390/ijerph19010530

García Izquierdo, C., Moreno, J. L., Hernández Fernández, M. T., & Polo, A. (2002). Metales pesados y sus implicaciones en la calidad del suelo. In CSIC - Centro de Ciencias Medioambientales (CCMA) (Ed.), *CSIC - Centro de Ciencias Medioambientales (CCMA)*. https://digital.csic.es/handle/10261/111812

García, R. A. B., & Reyes, A. S. (2009). Fitorremediación de metales pesados y microorganismos. *Cub@: Medio Ambiente y Desarrollo*, *9*(16). https://cmad.ama.cu/index.php/cmad/article/view/123/398

Gold, K., León-Lobos, P., & Way, M. (2004). *Manual de recolección de semillas de plantas silvestres para conservación a largo plazo y restauración ecológica*.

https://biblioteca.inia.cl/handle/20.500.14001/7000

Hernández, D., Espinosa, J., Peñaloza, M., Rodriguez, J., Chacón, J., Toloza, C., Arenas, M., Carrillo, S., & Bermúdez, V. (2018). Sobre el uso adecuado del coeficiente de correlación de Pearson: definición, propiedades y suposiciones. *Sociedad Venezolana de Farmacología Clínica y Terapéutica*, *37*(5). https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=55963207025

Hosseini Beinabaj, S. M., Heydariyan, H., Mohammad Aleii, H., & Hosseinzadeh, A. (2023). Concentration of heavy metals in leachate, soil, and plants in Tehran's landfill: Investigation of the effect of landfill age on the intensity of pollution. *Heliyon*, *9*(1). https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13017

House, J. E. (2019). Inorganic chemistry. In *Inorganic Chemistry*. https://doi.org/10.1016/C20170010844

Jacka, J. K. (2018). Annual review of anthropology: the anthropology of mining: the social and environmental impacts of resource extraction in the mineral age. *Annual Review of Anthropology*, *47*. https://doi.org/10.1146/annurev-anthro-102317-050156

Larenas, H. D., Fierro, R. V., & Fierro, R. C. (2017). Minería a Gran Escala: Una Nueva Industria para Ecuador. *Polémika 12*.

Lax, J., & Köthke, M. (2017). Livelihood strategies and forest product utilisation of rural households in Nepal. *Small-Scale Forestry*, *16*(4). https://doi.org/10.1007/s11842-017-9367-0

Ledesma, B. D. N. (2023). Elaboración de una propuesta de mejora de la gestión de residuos en la minería artesanal de oro en la provincia de Napo - Ecuador. *Escuela de Posgrado Newman - EPN*. https://repositorio.epneumann.edu.pe/handle/20.500.12892/496

Lombi, E., Zhao, F. J., Dunham, S. J., & McGrath, S. P. (2000). Cadmium accumulation in populations of Thlaspi caerulescens and Thlaspi goesingense. *New Phytologist*, *145*(1). https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2000.00560.x

López, E. E. A. (2023). La minería ilegal en las provincias de Napo y Pastaza y los derechos de los pueblos indígenas. *Riobamba*. http://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/10731

Mejía, T. (2017). Investigación correlacional : características , tipos y ejemplos. *Lifeder*.

Mesa, J., Mateos-Naranjo, E., Caviedes, M. A., Redondo-Gómez, S., Pajuelo, E., & Rodríguez-Llorente, I. D. (2015). Endophytic cultivable bacteria of the metal bioaccumulator Spartina maritima improve plant growth but not metal uptake in polluted marshes soils. *Frontiers in Microbiology*, *6*(DEC). https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.01450

Mestanza-Ramón, C., Cuenca-Cumbicus, J., D'Orio, G., Flores-Toala, J., Segovia-Cáceres, S., Bonilla-Bonilla, A., & Straface, S. (2022). Gold mining in the Amazon Region of

ecuador: History and a review of its socio-environmental impacts. *Land*, *11*(2), 221. https://doi.org/10.3390/land11020221

Nowrouzi, M., & Pourkhabbaz, A. (2014). Application of geoaccumulation index and enrichment factor for assessing metal contamination in the sediments of Hara Biosphere Reserve, Iran. *Chemical Speciation and Bioavailability*, *26*(2). https://doi.org/10.3184/095422914X13951584546986

Operacz, A., Bigaj, A., Hap, K., & Kotowski, T. (2022). The effect of sample preparation and measurement techniques on heavy metals concentrations in soil: case study from Kraków, Poland, Europe. *Applied Sciences*, *12*(4), 2137. https://doi.org/10.3390/app12042137

Ortiz-Cano, H. G., Trejo-Calzada, R., Valdez-Cepeda, R. D., Arreola-Ávila, J. G., Flores-Hernández, A., & López-Ariza, B. (2009). Phytoextraction of lead and cadmium in contaminated soils using pigweed (Amaranthus hybridus L.) and mycorrhiza. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, *15*(2), 161–168.

Palacios, W. A. (2016). *Árboles del Ecuador: Familias y Géneros*.

Palacios, W. A., & Jaramillo, N. (2016). Árboles amenazados del Chocó ecuatoriano. *Avances En Ciencias e Ingeniería*, *8*(14). https://doi.org/10.18272/aci.v8i1.508

Peña, O. G., Castellanos, J., Rafael, P., Sánchez, T., Puente Bruges, J., & Rivera Gómez, H. (2020). *No. 1-Abril de 2020, Bucaramanga, Colombia Comité Editorial Apoya: 0 2 Revista Encuentros*. www.fusader.orgwww.concienciaciudadana.org

Robinson, B. H., Chiarucci, A., Brooks, R. R., Petit, D., Kirkman, J. H., Gregg, P. E. H., & De Dominicis, V. (1997). The nickel hyperaccumulator plant Alyssum bertolonii as a potential agent for phytoremediation and phytomining of nickel. *Journal of Geochemical Exploration*, *59*(2). https://doi.org/10.1016/S0375-6742(97)00010-1

Rodríguez-Ortiz, J. C., Rodríguez-Fuentes, H., De Lira-Reyes, G., Martínez-de la Cerda, J., & Lara-Mireles, J. L. (2006). Capacidad de seis especies vegetales para acumular plomo en suelos contaminados. *Revista Fitotecnia Mexicana*, *29*(3). https://doi.org/10.35196/rfm.2006.3.239

Soria-Maldonado, F. E., & Cáceres-Romero, H. A. (2022). La minería ilegal y sus efectos en la vulneración de los derechos de la naturaleza. *Polo Del Conocimiento*, *7*(4), 1650–1664. https://doi.org/10.23857/pc.v7i4.3910

Suquila, F. A. C., & Tarley, C. R. T. (2019). Performance of restricted access copper-imprinted poly(allylthiourea) in an on-line preconcentration and sample clean-up FIA-FAAS system for copper determination in milk samples. *Talanta*, *202*, 460–468. https://doi.org/10.1016/j.talanta.2019.05.023

Tóth, G., Hermann, T., Da Silva, M. R., & Montanarella, L. (2016). Heavy metals in

agricultural soils of the European Union with implications for food safety. *Environment International*, *88*, 299–309. https://doi.org/10.1016/J.ENVINT.2015.12.017

Wang, Z., Liu, X., & Qin, H. (2019). Bioconcentration and translocation of heavy metals in the soil-plants system in Machangqing copper mine, Yunnan Province, China. *Journal of Geochemical Exploration*, *200*, 159–166. https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2019.02.005

Wei, M. L., Du, Y. J., & Zhang, F. (2011). Fundamental properties of strength and deformation of cement solidified/stabilized zinc contaminated soils. *Yantu Lixue/Rock and Soil Mechanics*, *32*(SUPPL.2).

Zhiñin Quezada, H. R., Poma Mendoza, B. V., González Nivelo, L. P., & Quito Ulloa, G. B. (2021). Etnobotánica y derechos de la naturaleza en el aja shuar: caso de estudio parroquia Nankais, cantón Nangaritza, provincia Zamora Chinchipe, Ecuador. *Siembra*, *8*(2). https://doi.org/10.29166/siembra.v8i2.3036

Zhong, W. S., Ren, T., & Zhao, L. J. (2016). Determination of Pb (Lead), Cd (Cadmium), Cr (Chromium), Cu (Copper), and Ni (Nickel) in Chinese tea with high-resolution continuum source graphite furnace atomic absorption spectrometry. *Journal of Food and Drug Analysis*, *24*(1). https://doi.org/10.1016/j.jfda.2015.04.010

Zuckerman, B. M., Mai, W. F., Harrison, M. B., & Marbán, M. N. (1985). *Fitonematología: manual de laboratorio*. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=9eIOAQAAIAAJ&oi=fnd&pg=PA7&dq=manual%2Brecoleccion%2Bplantas%2Blaboratorio&ots=6HNkP-rpPS&sig=JzwEOHUs79WB-_YkFXPEK3WOsf8#v=onepage&q=manual%2Brecoleccion%2Bplantas%2Blaboratorio&f=false

ANEXOS

Marco teórico.

La minería ilegal en la Amazonía ecuatoriana, particularmente en las provincias de Napo y Pastaza, ha generado graves consecuencias ambientales y sociales debido a la contaminación por metales pesados. La presencia de sustancias tóxicas como el mercurio, el plomo y el cadmio amenaza la biodiversidad de la región y la salud de las comunidades locales. En este marco teórico, exploraremos la técnica de la fitorremediación y su potencial para restaurar áreas degradadas y reducir la dispersión de metales pesados en la Amazonía ecuatoriana (López, 2023).

i. Minería y Contaminación por Metales Pesados

La minería es una actividad económica que involucra la extracción y procesamiento de minerales valiosos de la tierra. Sin embargo, la minería ilegal, que se lleva a cabo sin los permisos y regulaciones adecuadas, ha demostrado ser especialmente perjudicial en términos de contaminación ambiental (Soria, et al., 2022).

ii. Minería Ilegal en la Amazonía Ecuatoriana

La minería ilegal en la Amazonía ecuatoriana ha incrementado en los últimos años, amenazando la integridad de los ecosistemas y las comunidades locales. La falta de control y supervisión en estas áreas ha permitido la liberación descontrolada de metales pesados en los cuerpos de agua y el suelo, lo que resulta en problemas de salud y la pérdida de la biodiversidad (Mestanza-Ramón et al., 2022).

iii. Fitorremediación: Una solución sostenible

La fitorremediación es una técnica basada en el uso de plantas capaces de absorber y acumular metales pesados en su biomasa. Estas plantas, conocidas como hiperacumuladoras, pueden extraer los metales del suelo y el agua a través de sus raíces, almacenándolos en sus tejidos, y posteriormente pueden ser cosechadas y eliminadas de manera segura (Robinson et al., 1997).

iv. Plantas Hiperacumuladoras en la Amazonía Ecuatoriana

En la Amazonía ecuatoriana, se han identificado varias especies de plantas hiperacumuladoras con potencial para reducir la contaminación por metales pesados en áreas afectadas por la minería ilegal. Ejemplos de estas plantas incluyen *Pteris vittata, Brassica juncea* y *Thlaspi caerulescens.* Estas especies han demostrado su capacidad para acumular metales pesados como el mercurio, el plomo y el cadmio en sus tejidos (Gafur et al., 2022; Lombi et al., 2000).

La minería ilegal en la Amazonía ecuatoriana ha causado un daño significativo tanto en términos ambientales como sociales. La contaminación por metales pesados representa una amenaza para la biodiversidad de la región y la salud de las comunidades locales. Sin embargo, la fitorremediación ofrece una solución prometedora para abordar el problema de la contaminación y proteger la Amazonía. La utilización de plantas hiperacumuladoras pueden ayudar a restaurar áreas degradadas, reducir la dispersión de metales pesados y

proporcionar una solución sostenible y rentable. Fomentar la investigación e implementación de esta técnica puede contribuir a la restauración de los ecosistemas, reducir la dispersión de metales pesados y garantizar un futuro más saludable para la región y sus habitantes (Larenas et al., 2017; Ledesma, 2023).

La bioacumulación en árboles es un fenómeno en el que ciertos compuestos tóxicos presentes en el medio ambiente se acumulan en los tejidos de los árboles a lo largo del tiempo. Estos compuestos pueden incluir metales pesados, pesticidas, productos químicos industriales, entre otros. A medida que los árboles absorben agua y nutrientes del suelo, también pueden absorber estos compuestos tóxicos, que se acumulan en sus raíces, tallos, hojas y frutos. La bioacumulación en árboles puede tener consecuencias negativas para la salud de los ecosistemas y los seres humanos que dependen de ellos (Betancur et al., 2005).

Caracterización de las especies involucradas en este estudio

A continuación, se presenta una breve caracterización de las especies mencionadas, junto con algunas citas bibliográficas relevantes:

Aniba riparia (Canelo).

Es un árbol de la familia Lauraceae que se encuentra en la región amazónica. Se caracteriza por tener una corteza rugosa y hojas elípticas, Es un árbol de tamaño mediano que puede alcanzar alturas de hasta 30 metros, posee una corteza de color grisáceo y lisa, sus hojas son ovales y de color verde oscuro, produce flores pequeñas de color blanco o amarillo pálido, se encuentra principalmente en las selvas tropicales de América Central y del Sur, tiene propiedades medicinales y se utiliza en la industria de perfumes y aromaterapia (Aguirre et al., 2016).

Cedrela odorata (Cedro).

Es un árbol de la familia Meliaceae que se encuentra en América Central y Sudamérica. Se caracteriza por su madera aromática y resistente, Es un árbol de gran tamaño que puede alcanzar alturas de hasta 30 metros. Tiene una corteza de color grisáceo o marrón claro, con surcos profundos, sus hojas son pinnadas y de color verde brillante, produce flores pequeñas de color blanco o amarillo pálido, se encuentra en las regiones tropicales de América Central y del Sur. La madera de cedro es altamente valorada por su

durabilidad y aroma agradable (Aguirre et al., 2016; Aguirre et al., 2006).

Cordia alliodora (Laurel).

Es un árbol de la familia Boraginaceae que se encuentra en América Central y Sudamérica. Se caracteriza por tener hojas grandes y flores blancas. Es un árbol de tamaño mediano a grande que puede alcanzar alturas de hasta 40 metros. Tiene una corteza lisa de color grisáceo, sus hojas son ovales y de color verde oscuro, produce flores pequeñas de color blanco o amarillo pálido. Se encuentra en las selvas tropicales de América Central y del Sur, la madera de laurel es utilizada en la construcción y la fabricación de muebles (Aguirre et al., 2016).

Croton lechleri (Sangre de drago).

Es un árbol de la familia Euphorbiaceae que se encuentra en América Central y Sudamérica. Se caracteriza por su látex rojo y propiedades medicinales. Es un árbol de tamaño mediano que puede alcanzar alturas de hasta 20 metros. Tiene una corteza de color marrón rojizo que exuda una resina roja. Sus hojas son grandes, ovales y de color verde oscuro. Produce flores pequeñas de color amarillo verdoso, se encuentra en las selvas tropicales de América Central y del Sur (Zhiñin et al., 2021). La resina de sangre de grado tiene propiedades medicinales y se utiliza en la medicina tradicional.

Handroanthus chrysanthus (Guayacán).

Es un árbol de la familia Bignoniaceae que se encuentra en América Central y Sudamérica. Se caracteriza por sus flores amarillas y su madera resistente. Es un árbol de tamaño mediano a grande que puede alcanzar alturas de hasta 30 metros. Tiene una corteza de color grisáceo o marrón claro, con surcos profundos, sus hojas son pinnadas y de color verde brillante, produce flores grandes y vistosas de color amarillo brillante. Se encuentra en las regiones tropicales de América Central y del Sur. La madera de guayacán es muy resistente y se utiliza en la construcción y la fabricación de muebles (Palacios, 2016).

Otoba parvifolia (Doncel).

Es un árbol de la familia Myristicaceae que se encuentra en América Central y Sudamérica. Se caracteriza por tener hojas elípticas y frutos en forma de cápsula. Es un árbol de tamaño mediano que puede alcanzar alturas de hasta 20 metros. Tiene una corteza

de color marrón oscuro y rugosa. Sus hojas son oblongas y de color verde oscuro. Produce flores pequeñas de color blanco o amarillo pálido. Se encuentra en las selvas tropicales de América Central y del Sur. El bálsamo de la selva se extrae de la resina del árbol y se utiliza en la medicina tradicional (Aguirre et al., 2016).

Vochysia leguiana (Tamburo).

Es un árbol de la familia *Vochysiaceae* que se encuentra en América Central y Sudamérica. Se caracteriza por tener hojas lanceoladas y flores amarillas. Es un árbol de tamaño mediano a grande que puede alcanzar alturas de hasta 30 metros. Tiene una corteza de color marrón claro y lisa. Sus hojas son lanceoladas y de color verde brillante. Produce flores grandes y vistosas de color amarillo o naranja. Se encuentra en las regiones tropicales de América Central y del Sur. El palo de aceite se utiliza en la industria de la construcción y en la fabricación de muebles (Palacios et al., 2016).