

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

ESCUELA DE POSGRADO

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN AGROECOLOGÍA

MENCIÓN GESTIÓN AMBIENTAL



**“LAS PLANTAS NATIVAS DEL SECTOR RIO-NEGRO Y SU
CAPACIDAD FITOEXTRACTORA DE CADMIO EN CONDICIONES
DE VIVERO - TINGO MARIA”**

Tesis

para optar el título de

MAESTRO EN CIENCIAS EN AGROECOLOGÍA

MENCIÓN: GESTIÓN AMBIENTAL

PRESENTADO POR

TAYPE CAMARENA GRIS ROSARIO

Tingo María – Perú

2024



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES
UNIDAD DE POSGRADO



DIRECCIÓN

"AÑO DEL BICENTENARIO, DE LA CONSOLIDACIÓN DE NUESTRA INDEPENDENCIA, Y DE LA
CONMEMORACIÓN DE LAS HEROICAS BATALLAS DE JUNÍN Y AYACUCHO"

ACTA DE SUSTENTACION DE TESIS
Nro. 014-2024-UPG-FRNR-UNAS

En la ciudad universitaria, siendo las 07:00 p.m. del viernes 06 de diciembre de 2024, reunidos virtualmente vía Microsoft Teams, se instaló el Jurado Calificador a fin de proceder a la sustentación de la tesis titulada:

**“LAS PLANTAS NATIVAS DEL SECTOR RIO – NEGRO Y SU
CAPACIDAD FITOEXTRACTORA DE CADMIO EN CONDICIONES
DE VIVERO – TINGO MARIA”**

A cargo del candidato al Grado de Maestro en Ciencias en Agroecología, mención:
Gestión Ambiental TAYPE CAMARENA, GRIS ROSARIO.

Luego de la exposición y absueltas las preguntas de rigor, el Jurado Calificador procedió a emitir su fallo declarando **APROBADO** con el calificativo de **MUY BUENO** Acto seguido, a horas **08:50 p.m.** el presidente dio por culminada la sustentación; procediéndose a la suscripción de la presente acta por parte de los miembros del jurado, quienes dejan constancia de su firma en señal de conformidad.

Dr. CESAR SAMUEL LOPEZ LOPEZ
Presidente del Jurado



Dr. LADISLAO RUIZ RENGIFO
Miembro del Jurado

Ing. M.Sc. WARREN RIOS GARCIA
Miembro del Jurado

Dr. VICTOR MANUEL BETETA ALVARADO
Asesor

Dr. CASIANO AGUIRRE ESCALANTE
Asesor



"Año de la recuperación y consolidación de la economía peruana"

CERTIFICADO DE SIMILITUD T.I. N° 007 - 2025 - CS-RIDUNAS

El Director de la Dirección de Gestión de Investigación de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, quien suscribe,

CERTIFICA QUE:

El Trabajo de Investigación; aprobó el proceso de revisión a través del software TURNITIN, evidenciándose en el informe de originalidad un índice de similitud no mayor del 25% (Art. 3° - Resolución N° 466-2019-CU-R-UNAS).

Programa de Estudio:

Maestría en Gestión Ambiental

Tipo de documento:

Tesis	X	Trabajo de Suficiencia Profesional	
-------	---	------------------------------------	--

TÍTULO	AUTOR	PORCENTAJE DE SIMILITUD
LAS PLANTAS NATIVAS DEL SECTOR RIO-NEGRO Y SU CAPACIDAD FITOEXTRACTORA DE CADMIO EN CONDICIONES DE VIVERO - TINGO MARIA	TAYPE CAMARENA GRIS ROSARIO	22 % Veintidós

Tingo María, 15 de enero de 2024

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
UNIDAD DE GESTIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

Dr. Tomas Menacho Mallqui
JEFE

C.C. Archivo

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

ESCUELA DE POSGRADO

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN AGROECOLOGÍA

MENCIÓN GESTIÓN AMBIENTAL



“LAS PLANTAS NATIVAS DEL SECTOR RIO-NEGRO Y SU CAPACIDAD FITOEXTRACTORA DE CADMIO EN CONDICIONES DE VIVERO - TINGO MARIA”

Autor	: TAYPE CAMARENA, Gris Rosario
Asesor	: Dr. BETETA ALVARADO, Víctor M.
Coasesor	: Dr. AGUIRRE ESCALANTE, Casiano
Programa de investigación	: Ciencia y tecnología ambiental
Línea de investigación	: Biorremediación y recuperación de ambientes degradados
Eje temático	: Captura y acumulación de metales pesados
Lugar de ejecución	: Tingo María
Duración	: 06 meses
Financiamiento	: Propio

Tingo María – Perú, 2025

DEDICATORIA

A Dios:

Divino creador de todo lo que existe, quien me dio la vida y me dotó de inteligencia para poder conseguir uno de mis mayores anhelos.

A mis padres:

Seres a quienes les debo la vida, pero en especial a mi mami Genoveva y a mi hermana Mariela Taype y más en especial a mi hermanita Jessica Taype por su colaboración y por depositar su confianza en mí sin ello no hubiera sido posible este logro.

A mis queridos hijos:

Thiago Santhana e Ian José , por ser mi motivación para la culminación de la presente investigación.

A los docentes:

Por la enseñanza que nos brindan y el ejemplo que representan para nuestra formación como profesionales.

AGRADECIMIENTOS

- A la Universidad Nacional Agraria de la Selva, que a través de la Escuela de posgrado ha permitido cristalizar uno de mis anhelos profesionales.
- A los catedráticos de la escuela de posgrado – UNAS, por su contribución en mi formación académica.
- A los miembros del jurado de tesis: Dr. Cesar Samuel López López, presidente, Dr. Ladislao Ruiz Rengifo e Ing. M. Sc. Warren Ríos García miembros del jurado, por sus invalorable aportes y revisión del presente trabajo de investigación.
- Al Dr. Víctor Manuel Beteta Alvarado y al Dr. Casiano Aguirre Escalante asesores de la presente investigación, por su apoyo incondicional en el proyecto, ejecución y culminación.
- A los colaboradores anónimos, que en estos momentos sus nombres escapan de mi memoria, pero los tengo en mi corazón.

ÍNDICE

	Pág.
I. INTRODUCCION.....	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA	3
2.1. Antecedentes	3
2.2. Plantas nativas.....	4
2.2.1. Generalidades	4
2.2.2. Características de las especies nativas.....	5
2.2.3. Importancia de reproducir plantas nativas.....	5
2.2.4. Fitorremediación con plantas nativas	6
2.3. Metales pesados	6
2.3.1. Generalidades	6
2.3.2. Origen de la contaminación del suelo por metales pesados	7
2.3.3. Biodisponibilidad del metal pesado.....	7
2.3.4. Factores que afectan la disponibilidad de los metales pesados en los suelos.....	7
2.3.5. Cadmio	8
2.4. Fitorremediación	13
2.4.1. Generalidades	13
2.4.2. Factor de bioconcentración y translocación de metales	14
2.4.3. Factor de bioconcentración (BCF)	14
2.4.4. Factor translocación (TF)	15
2.4.5. Fitoextracción	15
2.4.6. Absorción y transporte de metales en las plantas	16
2.4.7. Fitoextracción para remediación de suelos.....	16
III. MATERIALES Y MÉTODOS.....	18
3.1. Lugar de ejecución.....	18
3.1.1. Zona de vida	18
3.2. Materiales y métodos	18
3.2.1. Materiales y equipos	18
3.2.2. Metodología.....	19
3.2.3. Técnicas e instrumentos de recolección de datos	22
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	25
4.1. Taxonomía de las plantas nativas seleccionadas	25
4.2. Capacidad de fitoextracción de cadmio de las especies en estudio	26
4.2.1. Efecto de las plantas nativas en la concentración de cadmio en su estructura. ...	26
4.2.2. Efecto de las plantas nativas en la concentración de cadmio en los suelos en estudio	29

4.3. Factor de bioconcentración y de translocación de cadmio de las plantas en estudio	32
V. CONCLUSIONES	36
VI. PROPUESTAS A FUTURO	37
VII. REFERENCIAS.	38

INDICE DE TABLAS

1. Niveles máximos de Cd en productos derivados de cacao (Quispe y Torres, 2024).....	10
2. Criterios de clasificación de plantas de acuerdo con su concentración de EPT en biomasa aérea	14
3. Criterios de clasificación de plantas por su comportamiento en la acumulación de EPT basados en el factor de translocación (TF) y el factor de bioconcentración (BCF)	15
4. Descripción de los tratamientos en estudio	20
5. Modelo del análisis de variancia	21
6. Clasificación de especies vegetales	23
7. Taxonomía de las especies nativas seleccionadas para usarlas como tratamientos.	25
8. Prueba de Duncan ($\alpha=0,05$) para la concentración de cadmio (ppm) en la estructura de las plantas nativas en estudio a los 90 días de la siembra	26
9. Análisis de varianza de la concentración de cadmio (ppm) en la estructura de la planta de las especies en estudio a los 90 días de la siembra.....	28
10. Prueba de Duncan ($\alpha=0,05$) para la concentraciones de cadmio (ppm) en los suelos en cada tratamiento en estudio a los 90 días de la siembra.	29
11. Análisis de varianza de la concentración de cadmio (ppm) en el suelo de cada tratamiento en estudio a los 90 días de la siembra	32
12. Factor de Bioconcentración (BCF) de cadmio en ppm en la estructura de las plantas (parte aérea y radicular) y su clasificación por tratamiento.	32
13. Factor de translocación (TF) de cadmio en la estructura de las plantas y clasificación por tratamiento.	34

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Pág.
1. Concentración de cadmio (ppm) en la estructuras de las plantas de cada tratamiento en estudio	27
2. Relación entre el nivel de cadmio (ppm) en la parte aérea y radicular de las plantas de cada tratamiento en estudio.	28
3. Relación entre el nivel de cadmio (ppm) en la estructura de la planta (aérea + radicular) de los tratamientos en estudio y el suelo.	29
4. Concentración de cadmio (ppm) en el suelo de cada tratamiento en estudio.....	30
5. Concentración de cadmio (ppm) por tratamiento en la estructura de la planta y en el suelo	33
6. Proporción de cadmio en (%) en la parte aérea y radicular de las plantas por tratamiento.	35
7. Vivero ubicado en la ciudad de Tingo María.	39
8. Unidad experimental T ₁ (<i>Baltimora recta L.</i>)	39
9. Unidad experimental T ₃ (<i>Colocasia esculenta L.</i>).....	39
10. Unidad experimental T ₂ (<i>Hyptis mutabilis(Rich.)Briq</i>).....	39
11. Unidad experimental T ₄ (<i>Cyperus rotundus L.</i>).....	39
12. Unidad experimental T ₅ (<i>Commelina fassiculata R &P.</i>)	39
13. En la grabación de video para mi visita de jurado de tesis por motivo de pandemia COVID- 19.....	39
14. Muestras de suelo listas para ser llevadas a laboratorio.	39
15. Muestras de plantas, listas para ser llevadas a laboratorio.	39
16. Resultados del laboratorio del análisis inicial de suelo.	39
17. Constancia de reconocimiento de las plantas nativas trabajadas.....	39
18. Resultado de laboratorio del análisis final de suelos de los tratamientos.....	39
19. Resultado de laboratorio del análisis final de las plantas nativas (parte aérea).....	39
20. Resultado de laboratorio del análisis final de las plantas nativas (parte radicular).....	39

RESUMEN

El presente trabajo de investigación tuvo como objetivo determinar la capacidad fitoextractora de cadmio de las plantas nativas del sector Rio-Negro en condiciones de vivero en Tingo María; para esto se diseñó un trabajo de investigación experimental, que consto de 5 tratamientos T₁: *Baltimora recta L.*; T₂: *Hyptis mutabilis(Rich.)Briq.*; T₃: *Colocasia esculenta L.*; T₄: *Cyperus rotundus L.* y T₅: *Commelina fassiculata R &P.* y 4 repeticiones, se cultivaron las plantas nativas en macetas de 4 kg de suelo de una parcela cacaotera contaminada por Cd durante 90 día, fueron distribuidas de forma aleatoria bajo las mismas condiciones de manejo. Los resultados detallan que las especies estudiadas no mostraron diferencia estadística respecto a la concentración (ppm) de cadmio en la estructura de la planta (parte aérea + parte radicular) a los 90 días de siembra. Sin embargo, se halló una ligera superioridad numérica en T₂: *Hyptis mutabilis(Rich.)Briq* = 0,19 ppm, mientras que la menor concentración fue en T₅: *Commelina fassiculata R &P* = 0,15 ppm. En el BCF (aéreo) y en el BCF (radicular), todas las especies son clasificadas como “excluseras”, demostrando que no tienen demasiada eficiencia para concentrar cadmio en la parte aérea ni radicular. Asimismo, de acuerdo al factor de traslocación (TF) en suelos contaminados con cadmio, las especies utilizadas no trasladan eficazmente los metales pesados de la raíz a la parte aérea (TF < 1), por lo que su potencial es el de fitoestabilizar metales en sus raíces.

Palabras clave: Plantas nativas, fitoextracción, cadmio.

The Plants Native to the Rio-Negro Sector and Their Phytoextractor Capacity for Cadmium Under Plant Nursery Conditions in Tingo Maria

Abstract

The objective of the research was to determine the phytoextractor capacity for cadmium of the plants in the Rio-Negro sector under plant nursery conditions in Tingo Maria, [Peru]. In order to do this, an experimental research work was designed that consisted of five treatments: T₁: *Baltimora recta* L.; T₂: *Hyptis mutabilis*(Rich.)Briq.; T₃: *Colocasia esculenta* L.; T₄: *Cyperus rotundus* L. and T₅: *Commelina fassiculata* R &P., and four repetitions. The native plants were grown in pots with 4 kg of soil from a cacao plot that was contaminated with Cd for ninety days. They were distributed in a random fashion under the same handling conditions. The results detail that the species that were studied did not show statistical differences with respect to the cadmium concentration (ppm) in the vegetative structure (aerial part + root part) at ninety days after planting. Nonetheless, a slight numerical superiority was found for T₂: *Hyptis mutabilis*(Rich.)Briq = 0.19 ppm, while the lowest concentration was from T₅: *Commelina fassiculata* R &P = 0.15 ppm. For the FBC (aerial) and the FBC (root) (acronyms in Spanish), all of the species were classified as “excluders,” demonstrating that they do not have very much efficiency in concentrating cadmium in the aerial nor the root part. At the same time, according to the translocation factor (TF; FT in Spanish) in soils contaminated with cadmium, the species that were utilized did not effectively translate the heavy metals from the root to the aerial part (TF < 1), thus, their potential is phyto-stabilizing metals in the roots.

Keywords: native plants, phytoextraction, cadmium.

I. INTRODUCCION

La contaminación por metales pesados, como el cadmio, representa una amenaza significativa para la salud humana y el medio ambiente. El cadmio, un metal altamente tóxico, puede acumularse en los suelos y ser absorbido por las plantas, ingresando así a la cadena alimentaria y afectando tanto a la flora como a la fauna (Clemens & Ma, 2020).

El cadmio es un contaminante particularmente preocupante debido a su alta toxicidad y su capacidad para bioacumularse en los organismos vivos (Clemens & Ma, 2020). La exposición al cadmio puede causar daños en los riñones, hígados, pulmones y sistema nervioso central (Mahar et al., 2022). Por lo tanto, es esencial desarrollar estrategias efectivas para la remediación de suelos contaminados con cadmio. En este contexto, la fitoremediación emerge como una técnica prometedora para la descontaminación de suelos, utilizando plantas para extraer y acumular metales pesados (Ali et al., 2021).

Estudios recientes han demostrado que ciertas especies de plantas nativas pueden acumular cantidades significativas de cadmio en sus tejidos, lo que las convierte en candidatas ideales para la fitoremediación (Sarwar et al., 2023). Además, las condiciones controladas de vivero permiten una evaluación detallada de los factores que influyen en la absorción y acumulación de cadmio, proporcionando datos valiosos para futuras aplicaciones en campo (Mahar et al., 2022).

El sector Río-Negro en Tingo María, Perú, es una región rica en biodiversidad, con una variedad de plantas nativas que podrían tener un potencial significativo como fitoremediadoras. Estas plantas, adaptadas a las condiciones locales, pueden ofrecer una solución sostenible y ecológica para la remediación de suelos contaminados con cadmio. La evaluación de la capacidad fitoremediadora de estas plantas bajo condiciones controladas de vivero es crucial para entender su potencial y desarrollar estrategias efectivas de manejo ambiental (Pilon-Smits, 2022).

La fitoremediación no solo se limita a la extracción de metales pesados, sino que también incluye la estabilización, volatilización y degradación de contaminantes (Ali et al., 2020). Las plantas nativas, debido a su adaptación a las condiciones locales, pueden ser más efectivas en la fitoremediación comparadas con especies exóticas (Pilon-Smits, 2022). Además, el uso de plantas nativas para la fitoremediación puede contribuir a la conservación de la biodiversidad local y a la restauración de ecosistemas degradados (Sarwar et al., 2023).

La fitoremediación de cadmio utilizando plantas nativas del sector Río-Negro en Tingo María bajo condiciones de vivero ofrece una oportunidad para evaluar el potencial de estas plantas en un entorno controlado. Los resultados de este estudio pueden proporcionar

información valiosa para el desarrollo de estrategias de fitoremediación aplicables en campo. Además, el conocimiento generado puede contribuir a la conservación de la biodiversidad local y a la restauración de ecosistemas degradados.

En resumen, esta investigación busca evaluar la capacidad fitoextractora de cadmio de las plantas nativas (*Baltimora recta* L. de la familia Asteraceae., *Hyptis mutabilis*(Rich.) Briq de la familia Lamiaceae, *Colocasia esculenta* L. de la familia Araceae , *Cyperus rotundus* L. de la familia Cyperaceae y por otro lado *Commelina fassiculata* R &P. de la familia Commelinaceae) del sector Río-Negro en Tingo María bajo condiciones de vivero. Este tema de investigación es una alta prioridad para la región y está vinculado al Objetivo-15, que "promueve la utilización razonable de los ecosistemas terrestres, luchando contra la desertificación, parando y revirtiendo la degradación de los suelos y deteniendo el desgaste de biodiversidad biológica". según la Organización de las Naciones Unidas (Bárcena, 2023). Los resultados de este estudio contribuirán al conocimiento sobre la fitorremediación ya que no hay investigaciones con estas especies en condiciones de vivero y también en la remediación de suelos contaminados en la región siendo una alternativa sostenible que pueda contribuir a la conservación de la biodiversidad local y a la restauración de ecosistemas degradados.

Objetivo general

1. Determinar las plantas nativas del sector Río-Negro y su capacidad fitoextractora de cadmio en condiciones de vivero - Tingo María ”.

Objetivos específicos

1. Seleccionar en campo cinco especies de plantas nativas para determinar su capacidad fitoextractora de cadmio en condiciones de vivero.
2. Determinar cuál de las plantas nativas tiene mayor capacidad fitoextractora.
3. Determinar el índice de bioconcentración y factor de traslocación de cadmio de las plantas nativas.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Antecedentes

Hernández et al.(2019) evaluaron lo toxico del cadmio para las plantas y tácticas para mitigar sus consecuencias, centrándose en el tomate. Sus conclusiones son las siguientes: 1) La toxicidad del cadmio reduciría el desarrollo, la función de fotosíntesis, la presencia de clorofila y el ocasionamiento de clorosis, fundamentalmente en hojas jóvenes. Igualmente, obstruye con la absorción y el transporte de nutrientes, provoca estrés oxidativo y afectaría la actividad enzimática 2) La generación de complejos entre cadmio y proteínas ricas en azufre es el más importante componente que permite que las plantas toleren a la toxicidad de los metales. Al producir estos complejos, las plantas regularizan o bloquean el ingreso y el traslado de cadmio, desintoxican el metal, toleran determinada concentración en los orgánulos intracelulares.

Méndez et al. (2020), evaluaron el desarrollo de la fitorremediación en sustratos contaminados de cadmio a través de una revisión de literatura y llegó a las siguientes conclusiones: La fitorremediación del suelo contaminado con cadmio es una técnica en expansión debido a su efectividad, simplicidad operativa y capacidad para realizarse in situ. Además, los avances en esta investigación han facilitado la identificación de especies nativas con potencial para la fitoextracción o fitoestabilización. La revisión señala que la combinación de especies con potencial fitorremediador y el uso de agregados como el ácido cítrico o la inoculación de microbios promotores del desarrollo y que mejoran significativamente la eficiencia en la extracción de cadmio del suelo contaminado.

Torres et al.(2021) evaluaron la fitorremediación de suelos contaminados con metales pesados y concluyeron que la planta *Alopecurus magellanicus* var. *bracteatus* y *Muhlenbergia angustata* están capacitadas en la absorción de contaminantes inorgánicos, lo que proporciona una importante ventaja sobre otros métodos tradicionales para la remediación de suelo contaminado con metal pesados como plomo (Pb) y cadmio (Cd).Sin embargo, señalan que se necesita más información sobre las interacciones entre las plantas y los microorganismos de la rizosfera, así como sobre las moléculas o metabolitos responsables del secuestro de metales pesados en las plantas y sobre las enzimas involucradas en los procesos de fitorremediación.

Pérez et al. (2022) evaluaron la capacidad de fitorremediación del Romerillo americano en suelos contaminados con cadmio y plomo. Concluyeron que, después de seis

meses de sembrado en sistemas experimentales, la planta asimiló altas concentraciones de estos metales en sus diferentes órganos, reduciendo significativamente su presencia en el suelo. La cantidad general de cadmio absorbida por la planta estuvo parecida en ambos sistemas, tanto en el de fitorremediación (23,39 mg/kg) como en el lugar con contaminación de (23,94 mg/kg). Los coeficientes biológicos de fitorremediación indicaron que el Romerillo americano tiene la capacidad de bioacumular tanto cadmio como plomo en suelos contaminados.

Ballen (2023) evaluó una revisión de plantas fitorremediadoras con capacidad para remover plomo de cuerpos de agua, llegando a las siguientes conclusiones: El análisis de los artículos revisados muestra un consenso sobre la eficacia de la fitorremediación para eliminar metales pesados, como el plomo, de cuerpos de agua contaminados por vertidos de actividades industriales, como la minería y aguas residuales. Especies como *Chrysopogon zizanioides* y *Alternanthera philoxeroides* podrían ser viables para procesos de fitorremediación, debido a su capacidad de eliminar grandes cantidades de plomo en poco tiempo y su disponibilidad en el país, lo que reduciría los costos de implementación. Sin embargo, dado que son especies introducidas, existe el riesgo de que desplacen a las especies nativas y degraden los ecosistemas en los que sean introducidas. De las 36 especies analizadas, 22 (equivalentes al 61,10 %) tienen características invasoras. Por tanto, su uso en estos procesos requiere un manejo cuidadoso, con atención especial al control de su crecimiento y reproducción.

2.2. Plantas nativas

2.2.1. Generalidades

Las plantas nativas son aquellas propias de una región específica, que están adaptadas a sus condiciones ambientales y en equilibrio con el ecosistema local. Estas especies cumplen un rol fundamental en los procesos ecológicos que sostienen la biodiversidad, ya que han coevolucionado con la fauna, los hongos y los microbios de su entorno, formando redes de interacción que benefician a todos los organismos involucrados. Por ejemplo, en ecosistemas como la Estepa Austral, plantas como los "coirones" y otras gramíneas perennes han desarrollado adaptaciones que les permiten sobrevivir en condiciones extremas, mientras que los animales locales dependen de ellas para alimento, polinización y dispersión de semillas. Este equilibrio entre las plantas nativas y su entorno resalta la importancia de su conservación, especialmente en áreas protegidas, donde se busca preservar estas especies y sus interacciones. Y ante la presencia de especies exóticas, las plantas nativas mantienen la estabilidad de los ecosistemas, ya que no solo sustentan la biodiversidad, también garantizan la funcionalidad de los hábitats naturales (Álvarez et al., 2021; Iribarren et al., 2023; Téllez et al., 2023).

2.2.2. Características de las especies nativas

Las especies se encuentran distribuidas en distintos ecosistemas según sus necesidades biológicas, y su ubicación geográfica está determinada por su capacidad de adaptación y desplazamiento, a menudo facilitada por interacciones con otras especies. Esta distribución natural, denominada autóctona, puede modificarse a lo largo del tiempo debido a procesos evolutivos. A diferencia de las especies nativas, las especies exóticas son introducidas a nuevos ecosistemas por acción humana, ya sea de manera intencional o accidental. Mientras que las especies nativas pueden encontrarse en múltiples países, las endémicas son exclusivas de una región específica, lo que les otorga un valor único. Las especies nativas son esenciales para mantener el equilibrio de los ecosistemas, y su eliminación o la introducción de especies foráneas puede causar alteraciones graves que lleven a la degradación del hábitat, a veces irreversibles sin intervención externa. Para restaurar ecosistemas dañados, se llevan a cabo procesos planificados que incluyen la introducción de especies pioneras, seguidas por especies secundarias y, finalmente, las nativas del lugar, con el objetivo de recuperar la biodiversidad y la funcionalidad del entorno. Además, estas acciones llegan a destacar la importancia de llegar a conservar las especies nativas y prevenir la propagación de invasoras para mantener la estabilidad ecológica (Álvarez et al., 2021; Iribarren et al., 2023; Téllez et al., 2023).

2.2.3. Importancia de reproducir plantas nativas

La reproducción de plantas nativas tiene múltiples propósitos, como la restauración de ecosistemas, con fines paisajístico y de jardinería, también con fines de conservación de la biodiversidad, educación ambiental, investigación científica, producción de alimentos y medicinas, etc. Por lo tanto, el principal objetivo es restaurar las áreas degradadas mediante el trasplante de plantines de especies nativas propias de la región. Este proceso acelera la revegetación natural, reduciendo la erosión del suelo que se intensifica durante las fuertes lluvias estivales. Además, incorporar especies nativas en jardines y espacios públicos, adaptadas a la escasez de agua, no solo disminuye la necesidad de riego, sino que también evita la expansión de especies invasoras como la rosa mosqueta y la retama hacia zonas afectadas, contribuyendo a la recuperación del equilibrio ecológico y la biodiversidad. Este enfoque integral promueve paisajes más resilientes y funcionales, esenciales para el bienestar ambiental y humano (Álvarez et al., 2021; Iribarren et al., 2023; Téllez et al., 2023).

2.2.4. Fitorremediación con plantas nativas

La fitorremediación es una técnica que utiliza plantas para descontaminar ambientes afectados por metales pesados, aprovechando su capacidad para absorber, acumular, degradar o estabilizar estos contaminantes. Las plantas nativas, adaptadas a las condiciones locales, son especialmente valiosas en este proceso debido a su resistencia y eficacia en la remediación de suelos y aguas contaminadas. En zonas áridas, diversas especies de plantas han demostrado potencial para la fitorremediación de suelos contaminados con metales pesados. Estas plantas, adaptadas a condiciones extremas, pueden ser empleadas para extraer, contener o inmovilizar contaminantes, contribuyendo a la recuperación de ecosistemas degradados. La implementación de la fitorremediación con plantas nativas ofrece ventajas significativas, como la reducción de costos y la minimización de impactos ambientales negativos. Además, al utilizar especies locales, se promueve la conservación de la biodiversidad y se facilita la aceptación social de los proyectos de remediación. Es fundamental considerar factores como la selección adecuada de especies, las características del sitio contaminado y propiedades específicas de los metales presentes para optimizar la eficacia de fitorremediación. La investigación y desarrollo continuo en este campo son esenciales para mejorar técnicas existentes y ampliar su aplicación en diversos contextos ambientales (Stylianou et al., 2020; Velásquez y Cobeña, 2022).

2.3. Metales pesados

2.3.1. Generalidades

Los metales pesados son aquellos con una densidad superior a 4 g/cm^3 y un peso atómico más elevado que 20, que no desempeñan una función biológica relevante y pueden ser perjudiciales en cantidades elevadas, interfiriendo con los procesos vitales de los organismos. Alguno de estos metales son mercurio, plata, cadmio y plomo, los cuales no se biodegradan y unos de estos tienden a bioacumularse en los seres vivos, lo que incrementa su toxicidad debido a su capacidad de penetrar las células. En el suelo, los metales pesados pueden encontrarse en diversas formas, como iones libres o complejos, y son absorbidos por las plantas, lo que plantea riesgos si ingresan a la cadena alimentaria. Su presencia debe ser monitoreada en suelos agrícolas para detectar cambios por actividades humanas. Estos metales pueden persistir en el ambiente por años, y su bioacumulación a través de la alimentación puede causar daños en el organismo. Se ha observado que la concentración de ciertos metales como hierro y manganeso disminuye en capas más profundas del suelo, lo que indica su movilidad y utilidad como indicadores de contaminación (Zhang et al., 2019; Núñez, 2022; Bárcena, 2023).

2.3.2. Origen de la contaminación del suelo por metales pesados

Los metales pesados se hallan en la naturaleza en concentraciones que, por lo general, no resultan perjudiciales para las especies vivas. Aunque no se pueden degradar ni destruir, pueden disolverse a través de procesos químicos y físicos, y ser lixiviados en el ambiente, formando complejos solubles que se dispersan en el ecosistema y eventualmente ingresan en la cadena trófica, especialmente en áreas contaminadas. A medida que estos metales se acumulan en el suelo, pueden volverse tóxicos, afectando a las plantas y, en consecuencia, a las especies que los consumen. Entre los metales más comunes en el suelo están el manganeso, cromo, zinc, níquel y plomo. La contaminación del suelo por metales pesados es un problema global, principalmente causado por actividades humanas como la urbanización, la industria, la agricultura, la tecnología y la minería (Zhang et al., 2019; Núñez, 2022; Bárcena, 2023).

2.3.3. Biodisponibilidad del metal pesado

La biodisponibilidad del metal es clave para determinar su nivel de toxicidad e impacto en la eficacia de la fitorremediación. El metal biodisponible es la fracción que las plantas pueden absorber del suelo, y su cantidad está influenciada por factores físicos, biológicos y químicos. En cuanto a los factores físicos, la textura del suelo juega un rol importante en la retención y disponibilidad de los metales. Biológicamente, la presencia de microorganismos asociados al rizoma, como bacterias fotosintéticas o micorrizas, puede aumentar el acumulación de metales en las plantas. Químicamente, el pH del sustrato y los agentes quelantes influyen en la solubilidad y persistencia de los metales; un pH más bajo aumenta su disponibilidad. Los agentes quelantes también mejoran la especiación del metal. Las enmiendas orgánicas, por su parte, pueden reducir la biodisponibilidad al inmovilizar los metales, mientras que los ácidos orgánicos simples, como el ácido cítrico, facilitan el desplazar ciertos metales, excepto el plomo (Zhang et al., 2019; Núñez, 2022; Bárcena, 2023).

2.3.4. Factores que afectan la disponibilidad de los metales pesados en los suelos

El pH es crucial para determinar la movilidad de los cationes, ya que una mayor movilidad de iones ocurre en suelos con pH bajo, y los metales tienden a ser más biodisponibles en condiciones ácidas. Cuando el pH es más alcalino, algunos metales pueden volver a la solución en forma de hidroxicomplejos, pero en general, al aumentar el pH, la solubilidad de los metales pesados se reduce (Bárcena, 2023). La materia orgánica juega un rol importantísimo en el proceso de adsorber metales por parte del suelo, actuando como ligando y facilitando la formación de complejos organometálicos que aumentan la solubilidad y

toxicidad de los metales pesados. Estos complejos son influenciados por los organismos del suelo que llegan a estabilizar o degradan dichos compuestos, y las materias orgánicas contribuyen al grado de aptitud para el intercambio catiónico, particularmente en suelos de uso agrícola (Santana y Zambrano, 2022). Por otro lado, la presencia de calcio en el suelo puede reducir la absorción de metales pesados, como el cadmio y el cobre, debido a la competencia iónica. Asimismo, un alto acumulación de algún metal pesado puede afectar la absorción de calcio por la planta, disminuyendo su presencia en las raíces, hojas y frutos. El calcio también puede encontrarse como fosfato o carbonato en el suelo, lo que permite controlar el cadmio a través de la alcalinización, reduciendo su absorción por las plantas (Villanueva, 2019; Vega, 2021). La textura jugaría un rol decisivo en el retenimiento y movimiento del metal pesado, especialmente en suelos arcillosos que ralentizan su lixiviación hacia las capas más profundas. Los minerales del suelo, con sus características eléctricas y superficies específicas, facilitan la adsorción de los metales, lo que incrementa el hecho que sea disponible para las plantas. Los carbonatos presentes en el suelo ayudan a mantener un pH alto, promoviendo la precipitación de metales pesados como el cadmio. Los óxidos de hierro y manganeso regulan estos metales, especialmente en suelos ácidos, favoreciendo la adsorción de elementos como cromo, cobre y plomo (Condezo y Huaraca, 2018; López et al., 2021).

2.3.5. Cadmio

2.3.5.1. Generalidades

El cadmio, un metal con características químicas similares al zinc, suele encontrarse como impureza en los minerales de zinc, y es un subproducto de su fundición y de otros metales (López et al., 2021; Quispe y Torres, 2024). Además, puede estar presente como impureza en fertilizantes fosforados debido a su asociación con minerales como la apatita y calcita. Aunque el zinc es esencial para los organismos, el cadmio es tóxico, por lo que se pueden mitigar sus efectos dañinos mediante tratamientos preventivos con zinc (Guzmán et al., 2022; Santana y Zambrano, 2022). Este sería considerado un metal traza más soluble y peligroso del suelo, debiéndose a su elevada capacidad de movilizarse y a su alta toxicidad estando en baja concentración, afectando especialmente a las plantas. Su disponibilidad y movilidad en los suelos dependen de componentes como el pH, la humedad, la cantidad de materia orgánica, el tipo de arcilla y la aplicación de fertilizantes fosforados (Vega, 2021). Las plantas absorben al cadmio, acumulándose en mayor cantidad en ciertas hortalizas, que luego son consumidas por el ser humano. En algunos estudios, se demostró que en plantas de fréjol,

el cadmio se acumula en las raíces, afectando a los microorganismos que fijan nitrógeno (Condezo y Huaraca, 2018; Villanueva, 2019).

2.3.5.2. Cadmio en el suelo

El desplazamiento del metal pesado en el sustrato puede alcanzar diversas rutas, como quedar retenidos por adsorción, ser absorbidos por las plantas e incorporarse en la cadena trófica, volatilizarse a la atmósfera o moverse a través del agua superficial y subterránea (Santana y Zambrano, 2022; Quispe y Torres, 2024). Aunque inicialmente los metales tienden a ser retenidos en el sustrato, también pueden movilizarse a lo largo del tiempo, influidos por procesos químicos y biológicos, así como por características del suelo como el pH, potencial redox, composición iónica, aptitud de intercambio y presencia de carbonatos u orgánicos (Condezo y Huaraca, 2018). La movilidad y disponibilidad de metales como el cadmio dependen de factores como la acidez, temperatura, cantidad de humus, y la capacidad de unión de minerales en el sustrato, lo que afecta su absorción por las plantas, siendo más probable en suelos ácidos, cálidos y con menor capacidad de unión de minerales, pero menos probable en suelos con mayor contenido de humus (López et al., 2021; Guzmán et al., 2022).

2.3.5.3. Contaminación en el suelo

El metal pesado en el suelo pueden quedar retenido o disuelto por mecanismos como la capacidad de adsorber, de complejar y de precipitar, podrían ser chupados por las plantas e integrarse a las cadenas alimenticias, volatilizarse hacia la aire o moverse hacia aguas superficiales o subterráneas (Vega, 2021). Su peligrosidad radica en que no se degradan ni química ni biológicamente, lo que les permite persistir en el ambiente por largos períodos, generando efectos negativos en los seres vivos, especialmente en el nivel más alto de la cadena trófica, donde las concentraciones son mayores (Condezo y Huaraca, 2018). El cadmio, liberado por actividades humanas, llega al suelo a través de residuos industriales, incineración de desechos urbanos y fertilizantes fosfatados, de donde se transfiere a las plantas, o mediante la irrigación con agua contaminada (Villanueva, 2019).

2.3.5.4. Ingreso del cadmio en la cadena trófica

Se encuentra presente el cadmio en los alimentos, especialmente en los vegetales, tiene su origen en el uso industrial de este metal, que luego es consumido por los animales a través de la cadena alimentaria (Núñez, 2022). El cadmio está frecuentemente

en suelos agrícolas debido al uso de fertilizantes, plaguicidas, aguas residuales y emisiones atmosféricas, siendo fácilmente absorbido por los vegetales. Los alimentos procesados también pueden ser una fuente de contaminación, debido a las etapas de elaboración y los materiales utilizados para el envasado (López et al., 2021). El cadmio atmosférico, mediante depósitos húmedos o secos, puede ingresar en la cadena alimenticia al ser absorbida por la hoja de la planta (por la parte foliar o el rizoma). Factores como el tipo de suelo, la acumulación en las plantas, el pH, la materia orgánica, la presencia de humus, la utilización de fertilizantes, el clima y la presencia de zinc, influyen en la tasa de transferencia del cadmio (Guzmán et al., 2022). Un estudio realizado identificó al chocolate como un primordial origen de Exhibición al cadmio en la dieta de personas de todas las edades, especialmente en los niños. Debido a esto, la Comisión Europea estableció límites máximos permitidos de cadmio en diferentes tipos de chocolates y derivados del cacao, que entraron en vigor desde enero de 2019, según lo revalidado por el reglamento 2021/1323 de la Unión Europea (Quispe y Torres, 2024).

Tabla 1. Niveles máximos de Cd en productos derivados de cacao (Quispe y Torres, 2024).

Clasificación	(%)	mg/kg peso fresco
Chocolate con leche que contiene materia seca total de cacao	< 30%	0,10
Chocolate que contiene materia seca total de cacao	< 50%	0,30
Chocolate con leche que contiene materia seca total de cacao	≥ 30 %	0,30
Chocolate que contiene materia seca de cacao	≥ 50%	0,80
Cacao en polvo vendido al consumidor final o como ingrediente en cacao en polvo edulcorado vendido al consumidor final (chocolate para beber)		0,60

2.3.5.5. Ingreso, transporte y acumulación del cadmio en plantas

El cadmio ingresa a las plantas especialmente en la forma de Cd²⁺, esto se da porque sus iones quelados generalmente no están en forma disponible para ser absorbidos por la parte radicular (Chancay et al., 2022). Las células epidérmicas son los primeros tejidos en atrapar iones, entre los cuales los pelos radiculares son los sitios más activos para absorber iones del suelo y son las principales estructuras de absorción de Cd²⁺. Se han identificado tres rutas principales de entrada de Cd²⁺, a las raíces (Hernández et al., 2019; Huaraca et al., 2020).

a. Primera vía

Se da Encima de la piel de la raíz, especialmente en la membrana citoplasmática, el CO_2 acuoso se descompone en H^+ y HCO_3^- debido a la respiración de las plantas (Li et al., 2016; Khan et al., 2017). El H^+ se intercambia con el Cd^{2+} presente en la matriz, lo que permite que el metal se adsorba en la parte superficial de la epidermis de la células de la parte radicular (Song et al., 2017). De esta manera el proceso de adsorción se realiza de manera rápida y no requeriría de energía y es la fase inicial para absorber mayor cantidad de Cd^{2+} a través de la vía apoplástica (Maddela et al., 2020).

b. Segunda vía

El Cd^{2+} , no es un elemento muy primordial para las plantas y por tanto no tiene un mecanismo de entrada específico (Nieves et al., 2019). Por lo tanto, entraría a la célula de las plantas por medio de transportistas de metal como Fe^{2+} , Zn^{2+} y Ca^{2+} , utilizando proteínas como IRT1 y LCT1. Cuando el cadmio se une a un transportador, ingresa a la parte superficial de la piel de la raíz mediante la vía del simplasto (Li et al., 2016; Khan et al., 2017; Song et al., 2017; Maddela et al., 2020).

c. Tercera vía

Para incrementar la forma disponible de iones en el sustrato de la raíz, Las plantas secretarían compuestos de bajo peso molecular como el ácido muguneico (MA), compondrían complejos con el Cd^{2+} . Así, el Cd^{2+} entra a la epidermis de la parte radicular mediante proteínas como YSL en forma de quelatos (Li et al., 2016). El transporte de cadmio a partir de la parte radicular hasta el tallo ocurre a través de tres mecanismos: la retención del metal en la célula de la parte radicular, su envío en dirección a la estela y el libramiento del metal al xilema (Khan et al., 2017; Chancay et al., 2022). El retenimiento ocurre debido a la acción de los muros apoplásticos y la quelación en la vacuola, siendo la fitoquelatina y otros tioles los principales quelantes en este desarrollo. Un mecanismo adicional propuesto para el retenimiento de cadmio en la parte radicular es el saturamiento de suberina en la pared de la célula durante la etapa de madurez de la exodermis y endodermis, lo que afectaría la flexibilidad de la pared y limita el movimiento del cadmio hacia la estela (Song et al., 2017; Hernández et al., 2019). El transporte y el desplazamiento del cadmio a partir del xilema al floema también es un paso clave, y se ha observado una elevada aglutinación de fitoquelatinas, glutatión y cadmio en la savia del floema en *Brassicanaapus*, lo que sugiere que el floema también transporta los complejos de Cd-fitoquelatina y Cd-glutatión (Maddela et al., 2020).

En particular, el absorbimiento de cadmio por la raíz del cacao compete directamente con los nutrientes como calcio, potasio, magnesio, hierro, cobre, manganeso y zinc, ya que ellos pueden ser chupados por los transportadores de proteínas (Nieves et al., 2019). Partiendo de una alta concentración a una baja concentración, el orden del acumulamiento de cadmio en los tejidos del cacao es el siguiente: raíces, tallos, hojas, cáscaras y granos de cacao, lo que significa que los granos de cacao contienen una chica cantidad de cadmio comparándolo con otros tejidos del vegetal (Chancay et al., 2022). El contenido de Cd^{2+} es mucho mayor en los granos de cacao. La elevación de la cantidad de Cd^{2+} en estos países puede deberse al contenido de Cd^{2+} en el suelo, el uso de fertilizantes químicos y la actividad industrial como son la minería o la contaminación ambiental (Huaraca et al. 2020).

De acuerdo a las investigaciones la clase de suelo afecta de manera significativa las capacidades de Absorbimiento de Cd^{2+} de las plantas de cacao. El estudio efectuó un estudio de correlaciónamiento de Pearson entre el contenido efectivo de cadmio de la matriz y ciertas variables foliares, y se halló que existía una correlación positiva significativa entre el contenido total de cadmio del tejido foliar y la matriz ($P < 0,05$). Por el contrario, hubo una correlación negativa significativa entre el Cd^{2+} en el sustrato y la cantidad de calcio y magnesio. Según investigaciones, el cacao absorbe metales pesados presentes de manera natural en el suelo y los aglomera en la semilla (Condezo y Huaraca, 2018; López et al., 2021).

2.3.5.6. Efectos del cadmio en la planta

Las consecuencias tóxicas del cadmio (Cd^{2+}) en las plantas han sido ampliamente estudiadas. El síntoma más visible de esta toxicidad es la decoloramiento y el enrollado por parte de las hojas. El descoloramiento ocurre a causa de que el cadmio reemplaza al hierro o al magnesio, lo que afecta la estabilidad y biosíntesis de la clorofila. Asimismo, la clorosis también está asociada con la deficiencia de fósforo y la disminución en el transporte de manganeso (López et al., 2021; Chancay et al., 2022). Entre los principales daños observados por la toxicidad del cadmio se encuentran el estrés oxidativo, la reducción del crecimiento y de la fotosíntesis, el desequilibrio nutricional y las alteraciones de la actividad enzimática. En general, la presencia de cadmio afecta de manera diferente la actividad enzimática. Las enzimas que contienen grupos sulfhidrilos vendrían a ser las más susceptibles a oxidarse a causa del cadmio, lo que rompe los enlaces disulfuro, desnaturalizando la proteína y afectando su función enzimática (Nieves et al., 2019; Maddela et al., 2020). Además, el

cadmio inhibe la actividad de las metaloenzimas, al sustituir a metales de cargas o tamaños similares por ejemplo el zinc o el magnesio. El magnesio esta, presente en la enzima RuBisCo, al ser reemplazado por cadmio provoca la disgregación de la enzima en subunidades más pequeñas (Li et al., 2016; Khan et al., 2017).

2.3.5.7. Absorción y translocación de cadmio en las plantas

Hernández et al. (2019), Huaraca et al. (2020) y Chancay et al. (2022), sustentan que las plantas poseen mecanismos especializados para absorber, translocar y almacenar nutrientes esenciales, pero también pueden absorber, translocar y acumular metales no esenciales debido a que estos presentan una conducta electroquímica similar a los nutrientes requeridos: a) Absorción: La absorción del cadmio por la planta es el primero de los pasos para entrar en la cadena trófica, y depende de varios factores. El desplazamiento del metal a partir del sustrato hacia las raíces. El paso del cadmio a través de la membrana de las células corticales que se encuentran en las raíces. La transportación del cadmio desde las células corticales hacia el xilema, que los lleva desde las raíces hasta los tallos. El desplazamiento del cadmio a partir de las hojas hasta los tejidos de acumulación, como en la semilla, tubérculo y fruto, a través del floema. b) Translocación: La translocación es el proceso por el cual el cadmio se trasladan desde las raíces a otras partes de la planta, lo cual depende también del movimiento en los tejidos específicos. c) Acumulación: La acumulación se refiere al aumento de la acumulación de una o unas sustancias químicas en algún organismo en comparación con su acumulación en el ambiente.

2.4. Fitorremediación

2.4.1. Generalidades

La fitorremediación es una técnica que utiliza de manera natural y directa a las plantas para absorber sustancias tóxicas a través de sus raíces, y translocarlas hacia las hojas y tallo. Esto facilita la eliminación de contaminantes, tanto orgánicos como inorgánicos, tales como metales, pesticidas y contaminantes orgánicos persistentes (Alderete et al., 2019; Rivera et al., 2024). Las plantas seleccionadas para fitorremediación deben cumplir preferentemente con ciertas características, como ser especies nativas de rápido crecimiento, con un sistema radicular grande, alta biomasa, adaptabilidad a diversos hábitats, y una gran tolerancia y capacidad para almacenar contaminantes en sus partes aéreas. Factores del ambiente como la temperatura, pH, las radiaciones solares y la salinidad del agua también influyen en el aumento y eficacia de las plantas en este proceso (Márquez et al., 2020; Abubakar

et al., 2023). Son considerados como principales métodos de fitorremediación la fitoextracción, fitodegradación, fitoestabilización, rizofiltración y fitosalinización (Ballen, 2023).

2.4.2. Factor de bioconcentración y translocación de metales

El seleccionamiento de plantas útiles en la remediación, es importante que presenten altas concentraciones del elemento con potencial tóxico (EPT) tanto en la parte aérea como en la radicular, y que presente altas capacidades de bioacumulación. En muchos casos, se recomienda que las plantas excluyan los EPT, es decir, que almacenen cantidades mínimas en su parte aérea, de modo que el mayor concentramiento de estos elementos quede inmovilizado en la parte radicular (la zona de influencia de las raíces) o en las mismas raíces (Ballen, 2023). Sin embargo, en la fitoextracción, se busca de que las plantas almacenen grandes cantidades de EPT en su parte aérea, lo que las convierte en plantas acumuladas. Para que este proceso sea eficiente y rentable, se prefieren plantas hiperacumuladoras (Rivera et al., 2024). Para clasificar a las plantas en función de su capacidad de acumulación de EPT, se mide la cantidad de estos elementos en las raíces, las partes aéreas y el sustrato o residuo. A partir de estos datos, se calculan factores de bioacumulación, entre los más usados se encuentran los factores de bioconcentración (BCF) y de translocación (TF). La siguiente tabla, se basa en el peso seco, clasificando de esta manera a las plantas basándose en su capa (Martelli et al., 2024).

Tabla 2. Criterios de clasificación de plantas de acuerdo con su concentración de EPT en biomasa aérea.

Clasificación	Zn	Cd	Pb	Ni	Co	Cu
	mg.kg ⁻¹					
Normal en sitios no contaminados	1-400	0,1-2,4	0,2-20	0,02-5	0,02-1	5-20
Fitotóxico	150-200	5-10	10-20	20-30	60-170	15-20
Hiperacumulación	10000	100	1000	1000	1000	1000
Nueva propuesta de hiperacumulación	3000	100	1000	1000	300	300

Fuente: Ballen (2023).

2.4.3. Factor de bioconcentración (BCF)

El factor de bioconcentración (BCF o BCF) es la relación entre las concentraciones de un elemento con potencial tóxico (EPT) en la planta y su concentración total en el suelo (Márquez et al., 2020). Este índice se utiliza ampliamente para evaluar la eficiencia de diferentes plantas en la acumulación de metales en su biomasa (Alderete et al., 2019). Cuando el valor del BCF es mayor a 1, indica que la planta tiene un potencial hiperacumulador,

por lo que se clasifica como hiperacumuladora. De manera contraria, la planta considerada excluida presenta un BCF menor a 1, y cuanto más bajo sea este valor, mayor será su capacidad para evitar la acumulación de EPT (Abubakar et al., 2023; Ballen, 2023).

2.4.4. Factor translocación (TF)

El factor de translocación (TF) es la relación entre la concentración de un elemento con potencial tóxico (EPT) en la parte aérea de la planta y su concentración en la parte radicular (Márquez et al., 2020). Este índice se utiliza para evaluar las capacidades de la planta para trasladar los metales pesados desde las raíces hasta la parte aérea (Martelli et al., 2024). Si el valor del TF es menor de 1, indica que los contaminantes se acumula mayormente en las raíces y no se transloca a la parte aérea, lo que clasifica a la planta como exclusora (Rivera et al., 2024). En cambio, si el TF es mayor de 1, los contaminantes se acumulan principalmente en la parte aérea, lo que caracteriza a la planta (Ballen, 2023).

Tabla 3. Criterios de clasificación de plantas por su comportamiento en la acumulación de EPT basados en el factor de translocación (TF) y el factor de bioconcentración (BCF)

Clasificación		BCF	
		>1	<1
TF	>1	Acumuladora (>1 hiperacumuladora)	-
	<1	-	Exclusora

Fuente: Ballen (2023)

2.4.5. Fitoextracción

La fitoextracción o fitoacumulación, aprovecha las capacidades de las plantas de absorción de algún contaminante, especialmente metales, del suelo y almacenarlos en su tallo y hoja. Una vez que los contaminantes se han acumulado en estas partes de la planta, pueden ser cosechadas y eliminadas o recicladas, lo que permite la remoción de los metales del suelo (Márquez et al., 2020). Para que este proceso sea viable, es fundamental que el acumulamiento ocurra en la parte aérea de la planta, que es fácil cosecharle, no obstante ciertos autores también consideran las extracciones de raíz como una alternativa en ciertas situaciones (Abubakar et al., 2023). Existen plantas que acumulan cantidades extremadamente altas de metal en su tejido aéreo, conocidas como plantas hiperacumuladoras, las cuales están consideradas como preferidas para estas técnicas. Algunas de estas plantas poseen la

competencia de absorción para una gran cantidad de metales en comparación con otras. Estas plantas se seleccionan y se siembran en sitios contaminados de acuerdo al metal presente y los rasgos del sitio (Rivera et al., 2024). Después de un período de crecimiento, las plantas se cortan y se incineran, o se utilizan como abono vegetal para reciclar los metales (Ballen 2023).

2.4.6. Absorción y transporte de metales en las plantas

La capacidad de absorción de la raíz es el principal medio por el cual muchos elementos ingresan a las plantas, y para ser absorbidos, estos elementos deben estar disueltos en agua. Los iones solubilizados en las zonas de la raíz ingresan en ellas mediante los movimientos de la fluidez del agua o por la propagación entre la solución del apoplasto de la raíz y el entorno circundante. Los iones disueltos y la solución del suelo pueden ingresar a la raíz a través de dos vías: la vía plástica (ingreso directo dentro de las células) o la ruta apoplástica, en la que los iones fluyen a partir de la epidermis hasta la Banda de Caspari atravesando el área intercelular (Rivera et al., 2024). La banda de Caspari actúa como una barrera que obligaría a los elementos químicos a seguir prolongando su camino por la vía simplástica, lo que significa que deben ingresar en el interior de la célula vegetal (Martelli et al., 2024). En las membranas celulares, la absorción de los iones se lleva a cabo generalmente a través de una proteína transportadora. Existen varias clases de transportadores de membranas, en el arsénico, dos transportadores juegan un rol clave en sus absorciones: la acuaporina y el transportador de fosfato. Las acuaporinas vienen a ser canales que permiten la entrada de agua y son esenciales para la absorción de moléculas sin carga, como glicerol, amoníaco, ácido bórico, ácido silícico y ácido arsenioso (Alderete et al., 2019; Abubakar et al., 2023).

2.4.7. Fitoextracción para remediación de suelos

La fitoextracción, o fitoacumulación, utiliza las capacidades de las plantas para absorber contaminantes del suelo, especialmente al metal, y almacenarlo en su tallo y hojas. Las áreas de las plantas en las que se acumulan estos contaminantes podrían ser cosechadas y eliminadas o ser recicladas, lo que permite la remoción del metal del suelo (Márquez et al., 2020). Para que este proceso sea considerado viable, es fundamental que el acumulamiento del contaminante ocurra en la parte aérea de la planta, que es más fácil de cosechar (Rivera et al., 2024). Sin embargo, algunos autores también han considerado las extracciones de las partes radiculares siendo esta una opción factible en ciertas situaciones. Hay plantas que exhiben un acumulamiento extremo de metal en sus tejidos aéreos, conocidas

como plantas hiperacumuladoras y estas son las que se prefieren en este tipo de técnicas (Martelli et al., 2024).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Lugar de ejecución

Este trabajo de investigación se efectuó en vivero, la instalación de vivero estuvo ubicado en Tingo María, Provincia de Leoncio Prado, departamento de Huánuco, cuyas coordenadas geográficas son:

- Latitud Sur : 09° 45' 09''
- Longitud Oeste : 75° 57' 00''.
- Altitud : 660 m.s.n.m.
- Precipitación anual : 3500 mm.

3.1.1. Zona de vida

De acuerdo a la ordenación proporcionada por Holdridge (1982), el lugar donde se realizó el trabajo de investigación pertenecería a la constitución vegetal bosque muy húmedo Pre -montano Tropical (transicional a bosque húmedo Tropical) bmh – PT, conforme a las regiones naturales del Perú se encontraría en Rupa o Selva Alta.

3.2. Materiales y métodos

3.2.1. Materiales y equipos

3.2.1.1. Materiales

El trabajo de investigación se realizó con, equipos, los cuales se describirán a continuación:

– **Materiales de campo**

Materiales y herramientas utilizadas en este estudio: Se utilizaron dos palas, dos picos, un muestreador, 4 sacos de 50 kg y machete, muestreador de suelo.

– **Materiales de vivero**

Se utilizaron 16 macetas para 4 kilos de tierra, machimbrado, plástico transparente malla verde.

3.2.1.2. Equipos

– **Equipos de campo.**

Se utilizaron cámara digital marca Sony de 16,10 megapíxeles – modelo: DSCW320/L y GPS marca Garmin – modelo: GPSMAP® 62S.

– **Equipos de laboratorio**

Se utilizó espectrofotómetro de absorciones atómicas

3.2.2. Metodología

La metodología de este estudio se basó en diferentes etapas (campo, vivero, laboratorio y oficina).

3.2.2.1. Tipo de investigación

Aplicada porque se recurrió a los principios de la ciencia botánica y química ya que se estipuló la concentración de cadmio en el suelo de la parcela cacaotera de Rio negro y en las plantas nativas. La investigación aplicada es la que se ejecuta ampliar el con el fin de desarrollar los conocimientos científicos en algunos campos específicos de la realidad, de acuerdo al progreso de la ciencia básica. Siendo un logro de la investigación aplicada es que expande los conocimientos de un ámbito concreto, generando que el conocimiento científico logre ser usado en un término más práctico.

3.2.2.2. Nivel de investigación

Experimental debido a que se manipularon la variable independiente (especies nativas) se midieron la variable dependiente (fitoextracción de Cd del suelo) y se comparó con el testigo (masetas sin plantas) así como también se comparó entre especies para determinar diferencias estadísticas de absorción entre especies y cuál de las especies es más eficaz para la fitoextracción de Cd del suelo.

3.2.2.3. Variables en estudio

Se emplearon las siguientes variables:

a. Variable independiente

especies nativas

b. Variable dependiente

Fitoextracción de cd. del suelo

3.2.2.4. Tratamientos en estudio

Los tratamientos en la presente investigación fueron las plantas nativas identificadas como:

Tabla 4. Descripción de los tratamientos en estudio

Clave	Descripción*	Sustrato
T ₁	<i>Baltimora recta L</i>	Sustrato contaminado por (Cd)
T ₂	<i>Hyptis mutabilis(Rich.)Briq.</i>	Sustrato contaminado por (Cd)
T ₃	<i>Colocasia esculenta L.</i>	Sustrato contaminado por (Cd)
T ₄	<i>Cyperus rotundus L.</i>	Sustrato contaminado por (Cd)
T ₅	<i>Commelina fassiculata R &P.</i>	Sustrato contaminado por (Cd)
T ₆	ninguna planta (control)	Sustrato contaminado por (Cd)

Fuente: Elaboración propia

3.2.2.5. Diseño estadístico

Experimental y se usó el diseño completamente al azar (DCA) se evaluaron los 06 tratamientos establecidos por las plantas nativas en prueba para la fitoextracción de cadmio (Cd), distribuidas en 04 repeticiones. Para esto, el modelo aditivo lineal usado fue el siguiente:

$$Y_{ij} = \mu + \alpha_i + \epsilon_{ij}$$

Dónde:

Y_{ij} = Valor de respuesta en la unidad experimental a la cual se aplicó el i-ésimo tratamiento de la j-ésima repetición.

μ = Efecto de la media general.

α_i = Efecto del i-ésimo tratamiento.

ϵ_{ij} = Efecto aleatorio del error experimental del i-ésimo tratamiento.

Para:

i = 1, 2, ..., 6 tratamientos.

j = 1, 2, 3 repeticiones

3.2.2.6. Análisis estadístico

Con este diseño, se elaboró el análisis de variancia (F. tab. = 0,01 y 0,05) para los niveles de cadmio (ppm) en las estructuras vegetales de las plantas nativas en prueba, también para los niveles de cadmio (ppm) en los suelos empleados para el

crecimiento de estas especies; esto considerándose los tratamientos en estudio (Tabla 4). Se establecieron las diferencias de las medias usando Duncan ($\alpha= 0,05$); para esto se determinó el modelo de análisis de la Tabla 5.

Tabla 5 Modelo del análisis de variancia

Fuente de variación	GL	CM	F Cal.	F Tab.
Tratamientos	t-1	$SC_{trat}/gl_{trat} = CM_{trat}$	CM_{trat}/CM_{ee}	$F_{\alpha}(gl_{trat}, gl_{ee})$
Error experimental	(t)*(b-1)	$SC_{ee}/gl_{ee} = CM_{ee}$		
Total	(t*b) - 1			

t = tratamientos; b = repetición

3.2.2.7. Ejecución del experimento

- Inspección de la parcela cacaotera contaminada con cadmio

Primero, se efectuó la inspección del área de estudio, pues permitieron obtener una enfoque verídico de la zona, ya se tenía referencia de que se trataba de una parcela contaminada por cadmio ya que años anteriores, había realizado una tesis donde constate que se trataba de un suelo contaminado por cadmio.

- Selección de las especies nativas y análisis de cadmio

Según Beltran V. (2001), Se seleccionaron las especies que presentaran las siguientes características:

- 1) Mucha biomasa
- 2) Que estuvieran muy distribuidas en el área.
- 3) Que no muestren sintomatologías de fitotoxicidad, característica esencial para su utilización en la fitorremediación.

- Identificación botánica de las especies

Las muestras fueron llevadas para su identificación correspondiente al M.Sc. Warren Ríos García (Profesor de Dendrología de la UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA).

- Extracción de suelo y homogenización para los almácigos.

Se extrajo suelo contaminado de la parcela cacaotera en costales y luego fueron llevados al vivero, donde se homogenizó y se realizó un análisis de suelo para

determinar el PH, la materia orgánica y la concentración de Cadmio luego se instalaron 4 kg de suelo en cada maceta. Beltran V. (2001).

- **Cultivo de plantas nativas**

Se plantaron los cormos de la especie *Colocasia esculenta L.*, las otras especies que no presentaron cormos se cultivaron por esquejes.

- **Análisis final de suelo y de planta experimental**

Pasados 90 días de haberlas sembrado se extrajeron las plantas y se sacaron las muestras de suelo de cada maceta para llevarlas a laboratorio para realizarle el análisis de su concentración de cadmio.

Las plantas fueron lavadas de manera cuidadosa tratando de no generales algún daño en sus partes. Después fueron depositadas en recipientes con agua para quitar los residuos de tierra. A continuación fueron lavadas con agua, limpiando delicadamente para no romper la planta y se enjuagaron dos veces con agua destilada. Cuando ya estuvieron bien enjuagadas fueron secadas colgándolas en la cuerda y luego fueron colocadas en bolsas de papel y fueron rotuladas las muestras con su código. Fueron llevadas a laboratorio sus partes aéreas (tallos y hojas) y sus partes radicales (raíz), al igual que las muestras de suelo de cada tratamiento para que le realicen sus correspondientes análisis de cadmio, fueron analizadas por el laboratorio LASA TINGO MARÍA. Finalmente se determinó si son funcionales en el proceso de fitoextracción.

3.2.3. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

3.2.3.1. Determinación de la capacidad fitoextractora de cadmio por las plantas nativas.

Para determinar la capacidad fitoextractora de cadmio por las plantas nativas se les tiene que clasificar de acuerdo a los factores de bioconcentración (BCF) y de translocación (TF). Los factores de bioacumulación y translocación mostraron si las especies de plantas se les podría considerar como hiperacumuladoras, acumuladoras, tolerantes o excluidoras (Diez, 2008), se utilizaron los valores de la Tabla 6.

Tabla 6. Clasificación de especies vegetales

BCF	TF	Clasificación
concentraciones exceden 1000 mg/Kg		Hiperacumuladora
>1	> 1	Acumuladora
>1	0.8-1	Acumuladora
0.8-1	> 1	Tolerante
0.1-1	0.1-1	Tolerante
<0.1	<0.1	Exclusora

Fuente: Diez (2008)

BCF: Factor de bioacumulación, TF: Factor de traslocación.

- **Factor de bioconcentración (BCF)**

El cálculo del factor de bioconcentración (BCF) se hizo para apreciar la relación entre los residuos químicos en las plantas y las concentraciones medidas en el medio donde viven (Mendieta, 2014). Los BCF se calcularon según la siguiente ecuación .

$$BCF_{aérea} = \frac{Ca}{Cs}$$

$$BCF_{raíz} = \frac{Cr}{Cs}$$

Donde:

$BCF_{aérea}$	=	Factor de bioconcentración en la parte aérea de la planta
$BCF_{raíz}$	=	Factor de bioconcentración en el rizoma de la planta
Ca	=	Concentración de cadmio en la parte aérea del vegetal (ppm)
Cr	=	Concentración de cadmio el rizoma de la planta (ppm)
Cs	=	Concentración de cadmio en el suelo (ppm)

Consecutivamente, se efectuó la clasificación de la planta con forme a los valores obtenidos del BCF, como es apreciable a continuación (Medina y Montano, 2014; Avelino, 2013):

BCF < 1	:	Planta exclusora
1 < BCF < 10	:	Planta acumuladora
BCF > 10	:	Planta hiperacumuladora

- **Factor de translocación**

El factor de translocación se consiguió efectuando el cálculo de acuerdo con la siguiente formula:

$$FT = \frac{Ca}{Cr}$$

Donde:

TF	=	Factor de translocación
Ca	=	Concentración de cadmio en la parte aérea de la planta (ppm)
Cr	=	Concentración de cadmio en el rizoma de la planta (ppm)

Consecutivamente, se efectuó la clasificación de la planta conforme a los valores adquiridos del TF, como como es apreciable a continuación (Deng et al., 2004; Yoon et al., 2006):

TF < 1	:	Planta exclusora
TF > 1	:	Planta acumuladora.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Taxonomía de las plantas nativas seleccionadas

Tabla 7. Taxonomía de las especies nativas seleccionadas para usarlas como tratamientos.

T₁	: <i>Baltimora recta L.</i>
<i>Nombre común</i>	: Baltimora
DIVISION	: MAGNOLIOPHYTA
CLASE	: MAGNOLIOPSIDA
SUB CLASE	: Asteridae
ORDEN	: Asterales
FAMILIA	: Asteraceae
GENERO	: Hyptis
ESPECIE	: mutabilis
T₂	: <i>Hyptis mutabilis(Rich.)Briq</i>
<i>Nombre común</i>	: Yerbita
DIVISION	: MAGNOLIOPHYTA
CLASE	: MAGNOLIOPSIDA
SUB CLASE	: Asteridae
ORDEN	: Lamiales
FAMILIA	: Lamiaceae
GENERO	: Hyptis
ESPECIE	: mutabilis
T₃	: <i>Colocasia esculenta L.</i>
<i>Nombre común</i>	: Pituquilla
DIVISION	: MAGNOLIOPHYTA
CLASE	: LILIOPSIDAE
SUB CLASE	: Arecidae
ORDEN	: Arecales
GENERO	: Colocosis
ESPECIE	: esculenta
T₄	: <i>Cyperus rotundus L</i>
<i>Nombre común</i>	: coquito
DIVISION	: MAGNOLIOPHYTA
CLASE	: LILIOPSIDA
SUB CLASE	: Commelinidae
ORDEN	: Cyperales
FAMILIA	: Cyperaceae
GENERO	: Cyperus
ESPECIE	: rotundus
T₅	: <i>Commelina fassiculata R &P.</i>
<i>Nombre común</i>	: pasto corrugado
DIVISION	: MAGNOLIOPHYTA
CLASE	: LILIOPSIDA
SUB CLASE	: Commelinidae
ORDEN	: Commelinales
FAMILIA	: Commelinaceae
GENERO	: Cyperus
ESPECIE	: rotundus

4.2. Capacidad de fitoextracción de cadmio de las especies en estudio

4.2.1. Efecto de las plantas nativas en la concentración de cadmio en su estructura.

La prueba de Duncan ($\alpha=0,05$) corrobora que, a los 90 días después de la siembra, no existirían diferencias significativas, dado que hay homogeneidad en todos los grupos, aun cuando existe diferencia aritmética de las concentraciones por cada tratamiento (Tabla 8).

Tabla 8. Prueba de Duncan ($\alpha=0,05$) para la concentración de cadmio (ppm) en la estructura de las plantas nativas en estudio a los 90 días de la siembra

Clave	Tratamientos	Concentración de cadmio (ppm)	Sig.
T ₂	<i>Hyptis mutabilis</i> (Rich.)Briq	0,19	a
T ₃	<i>Colocasia esculenta</i>	0,18	a
T ₁	<i>Baltimora recta</i> L	0,18	a
T ₄	<i>Cyperus rotundus</i> L	0,16	a
T ₅	<i>Commelina fassiculata</i> R &P.	0,15	a

Los valores de las columnas representados por la misma letra no presentan diferencias significativas

T₁: *Baltimora recta* L

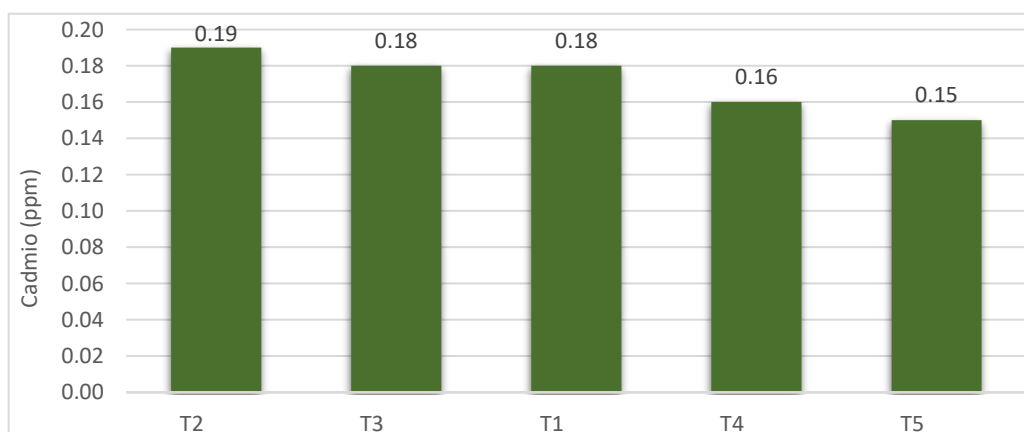
T₃: *Colocasia esculenta*

T₅: *Commelina fassiculata* R &P.

T₂: *Hyptis mutabilis*(Rich.)Briq

T₄: *Cyperus rotundus* L

Para la estructura de la planta (raíz + tallo) de las especies en estudio, *Hyptis mutabilis*(Rich.)Briq manifestó los mayores valores de concentración (T₂ = 0,19 ppm), continuado por *Colocasia esculenta* y *Baltimora recta* L (T₃ y T₁ = 0,18 ppm) y por *Cyperus rotundus* L. (T₄ = 0,16 ppm); por último, se tuvo menor concentración en *Commelina fassiculata* R &P. (T₅ = 0,15 ppm) (Figura 1).



Leyenda:

T₁: *Baltimora recta L*

T₂: *Hyptis mutabilis(Rich.)Briq*

T₃: *Colocasia esculenta*

T₄: *Cyperus rotundus L*

T₅: *Commelina fasciculata R & P.*

Figura 1. Concentración de cadmio (ppm) en la estructuras de las plantas de cada tratamiento en estudio

Se han identificado concentraciones comparativamente bajas de cadmio en la estructura de las especies, en comparación con suelos que presentan altos niveles de contaminación. Este fenómeno puede explicarse por la baja biodisponibilidad de cadmio en el sustrato inicial, el cual registró un promedio de 2,24 ppm. El Ministerio Nacional del Ambiente según Condezo y Huaraca (2018), este nivel excede los límites recomendados para la producción agrícola, ya que los suelos agrícolas no deben superar los 1,4 ppm. Vega (2021) indica que estas bajas concentraciones indican un bajo potencial de acumulación en las plantas analizadas. No obstante, cuando la concentración de cadmio en el sustrato aumenta, ya sea por causas naturales o antropogénicas, el metal se vuelve más biodisponible para las plantas. Barraza et al. (2017) y Argüello et al. (2019), indican que en suelos con elevados niveles de cadmio, este es fácilmente transferido a las plantas, lo que genera su bioacumulación en diversas partes de la misma. Oc et al. (2018) y Meter et al. (2019) afirman que especies como *Theobroma cacao* presentan mayores concentraciones de cadmio en sus estructuras de la planta, ya que este metal es absorbido, trasladado y acumulado debido a su similitud electroquímica con los nutrientes esenciales de la planta.

En la Tabla 9 se detalla el análisis de varianza ($\alpha=0,05$) efectuado a los niveles promedio de cadmio en la estructura vegetal (parte aérea + parte radicular) de las especies en estudio conforme con los tratamientos. Se señala que a los 90 días de siembra no

existen diferencias significativas entre las concentraciones de cadmio en la estructura de los individuos en estudio, lo que indica que todas las especies muestran concentraciones de cadmio similar en su estructura.

Tabla 9. Análisis de varianza de la concentración de cadmio (ppm) en la estructura de la planta de las especies en estudio a los 90 días de la siembra

F.V.	SC	gl	CM	Sig	p-valor
Modelo	4,80E-03	4	1,20E-03	ns	0,1755
Tratamiento	4,80E-03	4	1,20E-03	ns	0,1755
Error	0,01	15	6,60E-04		
Total	0,01	19			

CV 15,05

R² 0,33

ns: No existe significancia

La Figura 2, muestra la relación entre el nivel de cadmio (ppm) en la parte aérea y radicular en las especies en estudio, donde se observa un coeficiente de determinación (R²) muy bajo. Esto indicaría que no se encuentra relación o que esta es demasiado débil para considerarse relevante. Asimismo, también permitiría anticipar un factor de traslocación muy bajo.

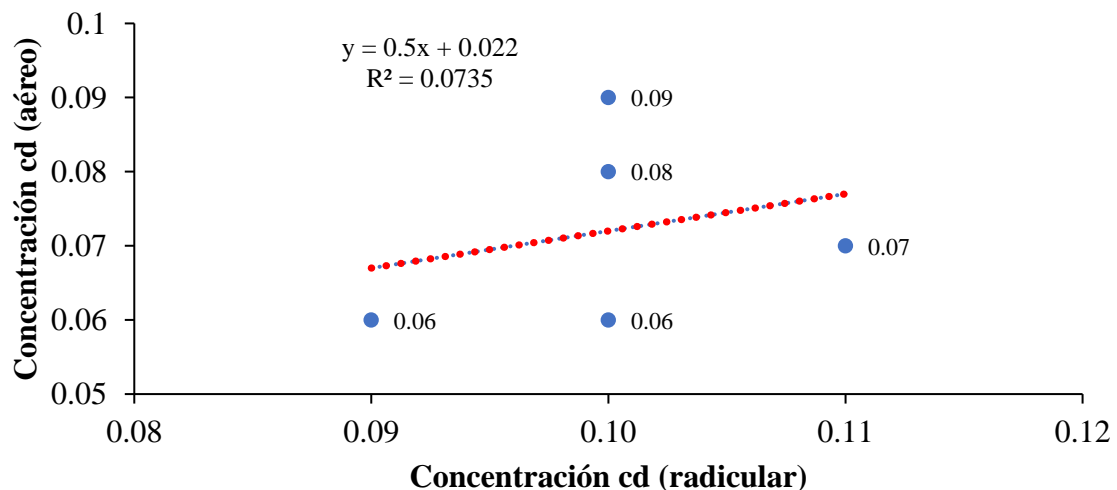


Figura 2. Relación entre el nivel de cadmio (ppm) en la parte aérea y radicular de las plantas de cada tratamiento en estudio.

Sin embargo, el coeficiente de determinación (R²) calculado para la estructura de la planta (aérea + radicular) de las especies en estudio y el suelo fue de 0,52, lo que muestra que existe una relación positiva moderada entre nivel de cadmio hallado en ambos.

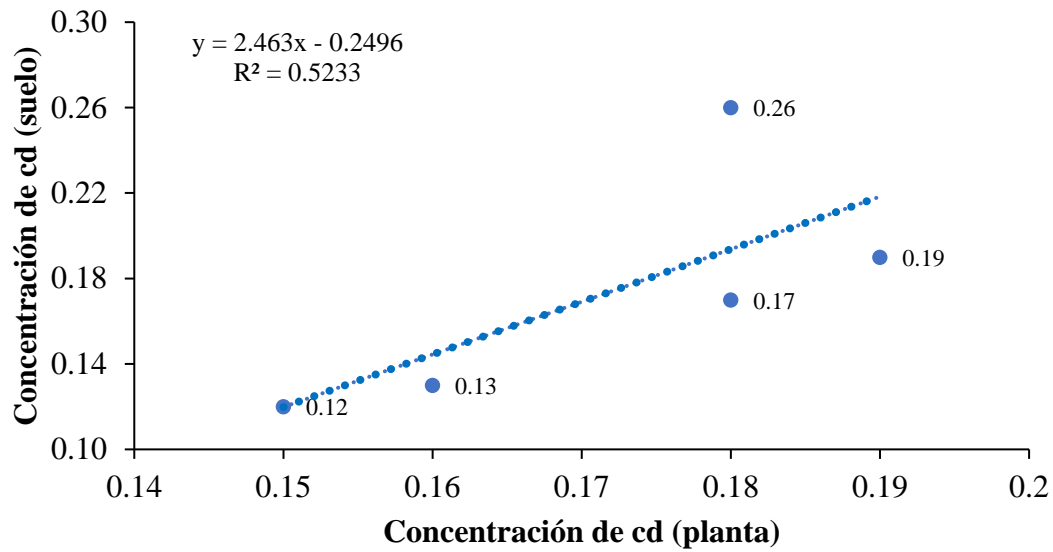


Figura 3. Relación entre el nivel de cadmio (ppm) en la estructura de la planta (aérea + radicular) de los tratamientos en estudio y el suelo.

4.2.2. Efecto de las plantas nativas en la concentración de cadmio en los suelos en estudio

Después de los análisis de las plantas que determinaron su capacidad de absorción de cadmio, se efectuó la identificación de los suelos contaminados empleados para el crecimiento de las plantas de cada tratamiento.

Partiendo de esto, se detalla con la prueba de Duncan ($\alpha=0,05$) que, a los 90 días posteriores de la siembra, se presentaron altas diferencias significativas, por cuanto existen 04 subgrupos homogéneos; se puede evidenciar en la desigualdad de las concentraciones por cada tratamiento en los suelos en estudio (Tabla 10).

Tabla 10. Prueba de Duncan ($\alpha=0,05$) para la concentraciones de cadmio (ppm) en los suelos en cada tratamiento en estudio a los 90 días de la siembra.

Clave	Tratamientos*	Concentración de cadmio (ppm)	Sig.**
T ₆	<i>Control</i>	0,28	a
T ₁	<i>Baltimora recta L</i>	0,26	b
T ₂	<i>Hyptis mutabilis(Rich.)Briq</i>	0,19	c
T ₃	<i>Colocasia esculenta</i>	0,17	c

T ₅	<i>Commelina fassiculata R &P.</i>	0,13	d
T ₄	<i>Cyperus rotundus L</i>	0,12	d

Valores de las columnas representados por la misma letra no presentan diferencias significativas

Leyenda:

T₁: *Baltimora recta L*

T₂: *Hyptis mutabilis(Rich.)Briq*

T₃: *Colocasia esculenta*

T₄: *Cyperus rotundus L.*

T₅: *Commelina fassiculata R &P*

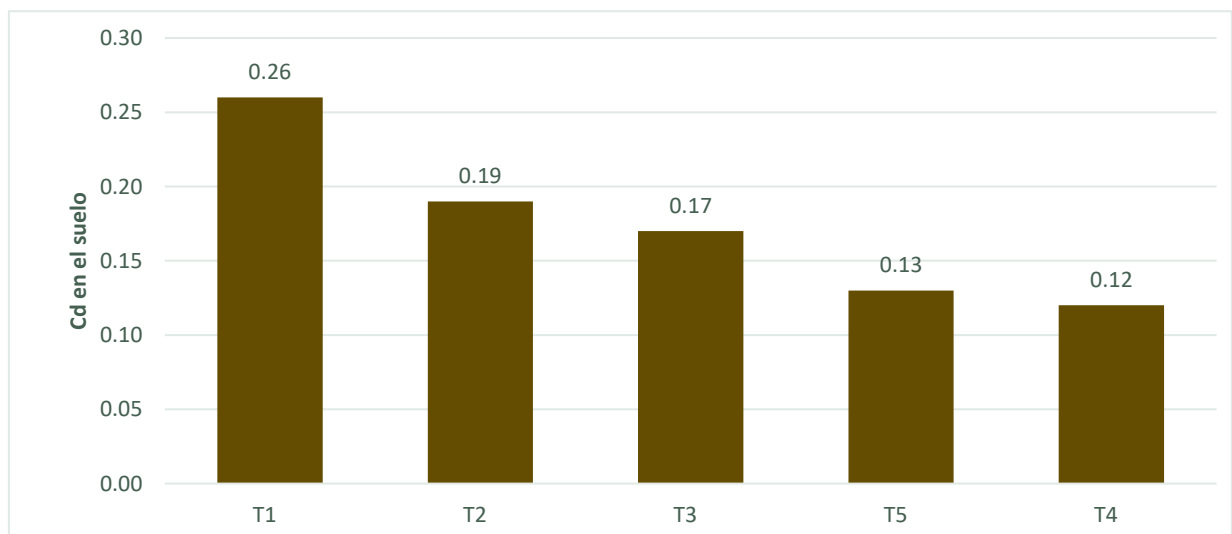


Figura 4. Concentración de cadmio (ppm) en el suelo de cada tratamiento en estudio

Leyenda:

T₁: *Baltimora recta L.*

T₂: *Hyptis mutabilis(Rich.)Briq*

T₃: *Colocasia esculenta L*

T₄: *Cyperus rotundus L.*

T₅: *Commelina fassiculata R &P.*

El promedio más alto de concentración de cadmio se registró en el suelo del tratamiento T1, con 0,26 ppm, mientras que el valor más bajo fue de 0,12 ppm en el suelo del tratamiento T4. Estos valores cumplen con lo establecido por el Ministerio Nacional del Ambiente (MINAM) según Condezo y Huaraca (2018), en sus Estándares de Calidad Ambiental para Suelos (ECA's) agrícolas, que especifican que los niveles no deben superar 1,4 mg.kg⁻¹. A nivel internacional, según Vega (2021), la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) clasificaría un suelo como normal al presentar menos de 0,35 mg/kg de cadmio, mientras que la Organización Mundial de la Salud (OMS) lo considera peligroso cuando los niveles alcanzan entre 3 y 5 mg/kg. En este contexto, los suelos podrían ser clasificados como levemente peligrosos. Además, la OMS recomienda que, para el

cultivo de cacao, las plantaciones se ubiquen en áreas con bajo contenido de cadmio, asegurando que los suelos no pasen los 1,4 mg.kg⁻¹ (1,4 ppm).

Por lo tanto, los suelos estudiados antes de aplicar los tratamientos no eran adecuados para la producción de cacao ya que como análisis inicial de suelo presentaba 2.24 ppm de cadmio disponible, especialmente si se tiene en cuenta lo señalado por Meter et al. (2019), quienes advierten sobre la presencia de cadmio en las exportaciones de América Latina. Ellos recomiendan evaluar los niveles de cadmio tanto en los suelos de los cultivos como en los granos de cacao. En su investigación, concluyen que si el contenido de cadmio en los granos supera los 0,5 mg/kg, es necesario investigar el origen del cadmio en los cultivos y tomar las medidas correctivas correspondientes.

La presencia de cadmio en los suelos puede tener diversos orígenes, pero entre los factores que han favorecido su acumulación se encuentran el uso intensivo de la tierra, la acidez del suelo, los niveles de materia orgánica y la aplicación de fertilizantes fosfatados en ciertos cultivos. En este sentido, Villanueva (2019) señala que el aumento gradual de cadmio en algunos suelos agrícolas podría estar relacionado con la fertilización fosfatada prolongada, y advierte que el uso de lodos residuales en la agricultura podría incrementar aún más estos niveles en distintos suelos. De igual manera, Condezo y Huaraca (2018) y López et al. (2021), mencionan que, en suelos ácidos, el cadmio se intercambia con mayor facilidad, volviéndose más disponible para las plantas. Este autor también explica que la fijación del cadmio es mayor en suelos con altos contenidos de materia orgánica, textura fina, alta capacidad de intercambio catiónico y baja presencia de aluminio intercambiable. En el caso de los suelos estudiados, estos factores parecen ser relevantes, ya que el área ha sido explotada intensivamente, lo que ha empobrecido el suelo y facilitado la acumulación de cadmio.

Los resultados son consistentes con lo señalado por Zhang et al. (2019), Núñez (2022) y Bárcena (2023), quienes explican que ciertos factores edáficos y de cultivo influyen en la absorción de cadmio por las plantas. Según el autor, la absorción de cadmio aumenta en suelos ácidos debido a la disminución del pH, y también se incrementa con la salinidad elevada, mayores concentraciones de cadmio, y la falta de zinc y manganeso. Además, McLaughlin indica que las verduras tienden a absorber más cadmio que las raíces, las raíces más que los cereales, y los cereales más que las frutas. Además destaca que las plantas de mayor edad tienen una mayor capacidad de absorción que las más jóvenes.

En ese contexto, la Tabla 11 detalla el análisis de varianza ($\alpha=0,05$) efectuado a los niveles promedio de cadmio en el suelo de cada tratamiento. Se demostraría que a los 90 días de siembra se presentan altas diferencias significativas entre las concentraciones

de cadmio en los suelos estudiados, considerando así que al menos una de las especies influyó la concentración del metal pesado en la estructura del suelo distinguiéndola de otras.

Tabla 11. Análisis de varianza de la concentración de cadmio (ppm) en el suelo de cada tratamiento en estudio a los 90 días de la siembra

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo		0,05	4	0,01	** <0,0001
Trat		0,05	4	0,01	** <0,0001
Error		2,00E-03	15	1,30E-04	
Total		0,05	19		

NS: No existe significancia

S: Existen diferencias estadísticas significativas al 5 % de probabilidad

AS: Existen diferencias estadísticas significativas al 1 % de probabilidad

4.3. Factor de bioconcentración y de translocación de cadmio de las plantas en estudio

Los valores usados para determinar el factor de bioconcentración (BCF) fueron los niveles de cadmio en el suelo y en la parte aérea y radicular de las plantas nativas de cada tratamiento. En ese sentido, la Tabla 12 detalla que el pasto *Cyperus rotundus* L. presentó el mayor valor de BCF aéreo (0,50) y BCF radicular (0,83); por el contrario, en *Baltimora recta* L. se obtuvo el valor más bajo de BCF aérea (0,31) y BCF radicular (0,38). Todas las especies se definen como “exclusora”, lo que indicaría que no tienen una concentración efectiva en la parte aérea ni en la parte radicular.

Tabla 12. Factor de Bioconcentración (BCF) de cadmio en ppm en la estructura de las plantas (parte aérea y radicular) y su clasificación por tratamiento.

Trata- miento	Concentración de cd			BCF aérea	Clasificación BCF (aérea)	BCF radicular	Clasificación BCF (raíz)
	Radicular	Aéreo	Suelo				
T1	0.10	0.08	0.26	0.31	Exclusora	0.38	Exclusora
T2	0.10	0.09	0.19	0.47	Exclusora	0.53	Exclusora
T3	0.11	0.07	0.17	0.41	Exclusora	0.65	Exclusora
T4	0.10	0.06	0.12	0.50	Exclusora	0.83	Exclusora
T5	0.09	0.06	0.13	0.46	Exclusora	0.69	Exclusora

T₁: *Baltimora recta* L

T₂: *Hyptis mutabilis*(Rich.)Briq

T₃: *Colocasia esculenta*

T₄: *Cyperus rotundus* L.

T₅: *Commelina fassiculata* R & P

Se observa una mayor concentración de cadmio en las raíces que en la parte aérea de las especies estudiadas. Aunque Alderete et al. (2019), Abubakar et al. (2023) y Ballen (2023), sugieren que es preferible que el contaminante se acumule en la parte aérea de la planta, ya que es más fácil de extraer, algunos autores proponen que, en ciertas circunstancias, la extracción de las raíces podría ser una opción viable. Esta alternativa dependería del método utilizado y de los recursos disponibles para llevar a cabo dicha remediación.

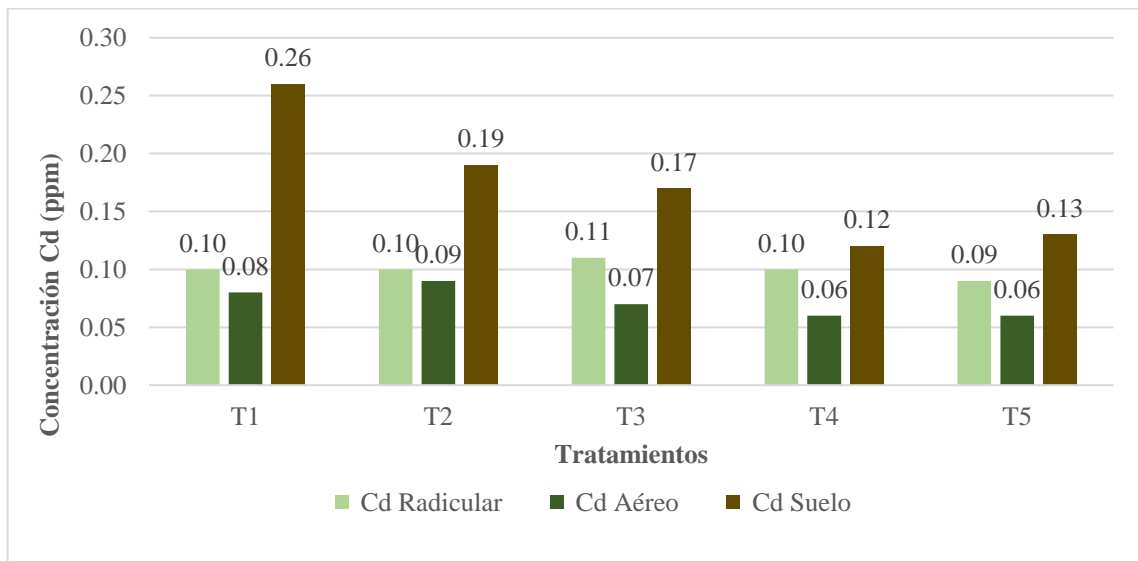


Figura 5. Concentración de cadmio (ppm) por tratamiento en la estructura de la planta y en el suelo

Leyenda:

T₁: *Baltimora recta L*

T₂: *Hyptis mutabilis(Rich.)Briq*

T₃: *Hyptis mutabilis(Rich.)Briq*

T₄: *Cyperus rotundus L.*

T₅: *Commelina fassiculata R & P*

Los factores de bioconcentración (BCF) y el factor de translocación (TF) se utilizan para conocer el potencial de una planta para la fitorremediación de suelos contaminados. El mayor TF se encontró al utilizar *Hyptis mutabilis (Rich.)Briq* (T2 = 0,90), mientras que el valor más bajo fue con *Cyperus rotundus L* (T4: = 0,60). Todas las especies se encuentran en la clasificación de “exclusora” (Tabla 13).

Tabla 13. Factor de translocación (TF) de cadmio en la estructura de las plantas y clasificación por tratamiento.

Tratamiento	Descripción	Concentración de Cd (ppm)		TF	Clasificación
		Aérea	Radicular		
T ₁	<i>Baltimora recta L</i>	0.08	0.10	0.80	Exclusora
T ₂	<i>Hyptis mutabilis(Rich.)Briq</i>	0.09	0.10	0.90	Exclusora
T ₃	<i>Colocasia esculenta</i>	0.07	0.11	0.64	Exclusora
T ₄	<i>Cyperus rotundus L</i>	0.06	0.10	0.60	Exclusora
T ₅	<i>Commelina fassiculata R &P.</i>	0.06	0.09	0.67	Exclusora

T₁: *Baltimora recta L*

T₂: *Hyptis mutabilis(Rich.)Briq*

T₃: *Hyptis mutabilis(Rich.)Briq*

T₄: *Cyperus rotundus L.*

T₅: *Commelina fassiculata R &P*

Según lo mencionado por Martelli et al. (2024), si el factor de translocación (TF) es mayor a 1 ($TF > 1$), significa que la planta transfiere de manera eficiente los metales pesados desde las raíces hacia la parte aérea, lo que indica su potencial para hiperacumular metales en esa zona. En cambio, si el TF es menor a 1 ($TF < 1$), la planta no realiza una transferencia eficiente de los metales pesados hacia la parte aérea, lo que sugiere que su capacidad radica en la fitoestabilización de metales en sus raíces, como sería el caso de las especies estudiadas.

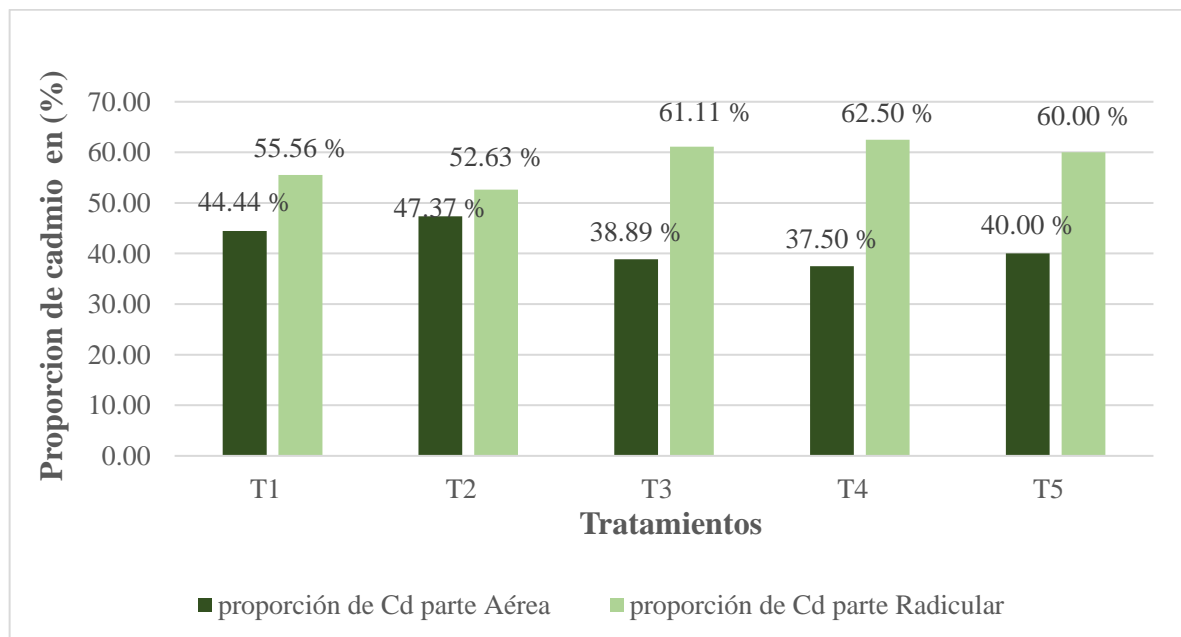


Figura 6. Proporción de cadmio en (%) en la parte aérea y radicular de las plantas por tratamiento.

En la presente investigación, ninguna de las especies de plantas acumuló concentraciones de cadmio que superen los 100 mg/kg, lo que implica que ninguna puede clasificarse como hiperacumuladora de cadmio, de acuerdo con lo señalado por Martelli et al. (2024). Las plantas tolerantes suelen limitar la transferencia de metales desde el suelo hacia las raíces y desde las raíces hacia la parte aérea, lo que resulta en una menor acumulación en su biomasa. Por el contrario, las plantas hiperacumuladoras tienen la capacidad de translocar activamente los metales hacia su biomasa aérea. Según Márquez et al. (2020) y Rivera et al., (2024), en las plantas que presentan valores de TF y BCF menores a uno no son adecuadas para la fitoextracción. Asimismo, destacan la importancia de que la acumulación de metales se produzca en la parte aérea de la planta, ya que esto facilita la cosecha y la extracción del metal concentrado en la biomasa.

La fitoextracción debe considerarse un enfoque tecnológico a largo plazo, que implica múltiples ciclos de cultivo para lograr niveles de metales permitidos por la legislación. Por último, dado que no hay investigaciones previas sobre las especies estudiadas, no es factible realizar comparaciones cuantitativas con los resultados obtenidos, los cuales servirán como referencia para futuras evaluaciones. Es fundamental señalar que el cadmio es un contaminante altamente estable y no degradable, caracterizado por su alta movilidad, toxicidad y capacidad de bioacumularse en diversos organismos vivos (Barraza et al., 2017; Oc et al., 2018). En la actualidad, este contaminante se encuentra ampliamente distribuido en áreas agrícolas y forestales, resultado de la intensificación de actividades antrópicas nocivas y/o fenómenos naturales. La presencia de cadmio en los cultivos agrícolas genera efectos negativos, como lo mencionan Argüello et al. (2019) y Meter et al. (2019), quienes indican que este contaminante provoca una disminución en el crecimiento y la fotosíntesis de las especies afectadas, siendo la clorosis uno de los principales efectos de su intoxicación.

V. CONCLUSIONES

Las cinco especies de plantas nativas que se seleccionaron en campo para estudiar su capacidad fitoextractora en condiciones de vivero fueron: (T₁: *Baltimora recta* L.; T₂: *Hyptis mutabilis*(Rich.)Briq.; T₃: *Colocasia esculenta* L.; T₄: *Cyperus rotundus* L. y T₅: *Commelina fassiculata* R &P.)

Las plantas nativas no mostraron diferencia estadística respecto a la concentración (ppm) de cadmio en la estructura de la planta (parte aérea + parte radicular) a los 90 días de siembra. Sin embargo, se halló una ligera superioridad numérica en la *Hyptis mutabilis*(Rich.)Briq (T₂ = 0,19 ppm), mientras que la menor concentración fue en *Commelina fassiculata* R &P. (T₅ = 0,15 ppm).

La concentración de cadmio en el suelo presentó diferencias estadísticas en las diferentes especies en estudio. El tratamiento (T₆) *Control* tuvo una concentración de concentración (0,28 ppm). En cuanto a las especies, *Baltimora recta* L (T₁) presentó mayor nivel que las demás (0,26 ppm), mientras que el menor nivel estuvo en *Cyperus rotundus* L (T₄ = 0,12 ppm). Se demostró que el uso de estas especies redujo la concentración de cadmio en el suelo.

En el BCF (aéreo) y en el BCF (radicular), todas las especies son clasificadas como “excluseras”, demostrando que no tienen demasiada eficiencia para concentrar cadmio en la parte aérea ni radicular. Asimismo, de acuerdo al factor de traslocación (TF) en suelos contaminados con cadmio, las especies utilizadas no trasladan eficazmente los metales pesados de la raíz a la parte aérea (TF < 1), por lo que su potencial es el de fitoestabilizar metales en sus raíces.

VI. PROPUESTAS A FUTURO

- Se recomienda evaluar la fitorremediación de suelos contaminados con cadmio utilizando *Baltimora recta*, *Hyptis mutabilis*, *Colocasia esculenta*, *Cyperus rotundus* y *Commelina fasciculata* durante un período de tiempo más largo (por ejemplo, 180 días o más) para obtener resultados más robustos y conclusivos sobre su efectividad en la fitorremediación de suelos con cadmio.
- Debido a que *Hyptis mutabilis* mostró capacidad para reducir ligeramente la concentración de cadmio en la estructura de la planta (parte aérea y parte radicular) en comparación a las demás especies evaluadas, se recomienda seguir investigando y promoviendo esta especie para la fitorremediación de suelos contaminados.
- Como *Cyperus rotundus*, presentó menor concentración de cadmio en el suelo, se sugiere evaluar más a fondo las características específicas de esta especie para emplearlas en programas de restauración de suelos contaminados con cadmio.
- Aunque todas las especies estudiadas fueron clasificadas como "excluseras" y no mostraron eficiencia en la traslocación del cadmio hacia la parte aérea, se recomienda investigar formas de mejorar este proceso, para mejorar el potencial de fitoextracción de estas plantas y hacerlas más eficaces en la limpieza de suelos con cadmio.

VII. REFERENCIAS.

- Abubakar, F., Ibrahim, S., y Moruf, O. (2023). Phytoremediation of aquaculture wastewater: A review of microalgae bioremediation. *Science World Journal*, 18(1), 83–89. <https://www.ajol.info/index.php/swj/article/view/246335>
- Alderete, B., Valles, M., Canales, S., Peralta, D., y Orrantia, E. (2019). Bioconcentración de pb, cd y as en biomasa de *eleocharis macrostachya* (Cyperaceae). *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, 35(Special Issue 3), 93–101. <https://doi.org/10.20937/RICA.2019.35.esp03.11>
- Ali, H., Khan, E. y Sajad, MA (2021). Fitorremediación de metales pesados: conceptos y aplicaciones. *Chemosphere*, 262, 127945.
- Álvarez, M., Aschero, V., Barros, A., Bilbao, T., Bonjour, L., Fernández, E., y Pissolito, C. (2021). Reproducción de plantas nativas de la precordillera mendocina para la restauración postincendios. *Instituto Argentino de Nivología y Glaciología IANIGLA-CONICET*. <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/173821>
- Argüello, D., Chávez, E., Lauryssen, F., Vanderschueren, R., Smolders, E., Montalvo, D. (2019). Soil properties and agronomic factors affecting cadmium concentrations in cacao beans : A nationwide survey in Ecuador. *Science of the Total Environment*, 649, 120–127. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969718332649>
- Ballen, J. (2023). *Revisión de plantas fitorremediadoras con capacidad de remoción de plomo en cuerpos de agua* [Tesis de pregrado, Universidad Cooperativa de Colombia]. Repositorio Institucional UCC. <https://hdl.handle.net/20.500.12494/55171>
- Barraza, F., Schreck, E., Lévêque, T., Uzu, G., López, F., Ruales, J., y Maurice, L. (2017). Cadmium bioaccumulation and gastric bioaccessibility in cacao: A field study in areas impacted by oil activities in Ecuador. *Environmental Pollution*, 229, 950–963. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0269749117315713>
- Bárcena, S. (2023). *Estrategias de recuperación de suelos contaminados con metales y metaloides* [Tesis de Maestría, Universidad Politécnica de Madrid]. Repositorio Institucional UPM. <https://oa.upm.es/76991/>
- Condezo, S. y Huaraca, C. V. (2018). *Cuantificación de plomo, cadmio y arsénico en granos de cacao (Theobroma cacao L.) y café (Coffea arábica L.) de la zona de Jaen, Cajamarca durante el periodo de febrero – julio 2018* [Tesis de pregrado, Universidad Norbert Wiener]. Repositorio Institucional UWiener. <https://hdl.handle.net/20.500.13053/2571>

- Chancay, L., Delgado, M., y Salas, C. (2022). Cadmio en el cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.) y sus efectos ambientales. *La Técnica: Revista de las Agrociencias*, edición especial, 91-110.
https://www.researchgate.net/publication/360061071_Cadmio_en_el_cultivo_de_cacao_o_Theobroma_cacao_L_y_sus_efectos_ambientales
- Clemens, S., & Ma, LQ (2020). Genes y procesos relevantes para la hiperacumulación de metales pesados en plantas. *Plant Physiology*, 182(2), 698-712.
- Guzmán, V., Razo, R., Vásquez, G., y Hernández, M. (2022). Factores que condicionan la empleabilidad de las plantas en fitorremediación. *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, 10(19), 42-49.
<https://doi.org/10.29057/icbi.v10i19.9193>
- Hernández, Y., Rodríguez, P., Peña, M., Meriño, Y., y Cartaya, O. (2019). Toxicidad del Cadmio en las plantas y estrategias para disminuir sus efectos. Estudio de caso: El tomate. *Cultivos Tropicales*, 40(3), e10.
<https://ediciones.inca.edu.cu/index.php/ediciones/article/view/1524>
- Huaraca, J., Pérez, L., Bustinza, L., y Pampa, N. (2020). Enmiendas orgánicas en la inmovilización de cadmio en suelos agrícolas contaminados: una revisión. *Información Tecnológica*, 31(4), 139-152.
https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642020000400139
- Iribarren, M., Saiz, M., y Roskos, G. (2023). Guía para el cultivo de plantas nativas de la estepa austral: experiencias del vivero experimental del Parque Nacional Monte León. *Editorial Parques Nacionales*.
https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/plantas_nativas_monte_leon.pdf
- Li, X., Zhou, Q., Sun, X., y Ren, W. (2016). Effects of cadmium on uptake and translocation of nutrient elements in different welsh onion (*Allium fistulosum* L.) cultivars. *Food Chemistry*, 194, 101–110.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0308814615011474>
- López, M., Jaimez, R., y Orozco, L. (2021). El cadmio en el cultivo de cacao. *Ministerio de Agricultura y Ganadería*. https://cefaecuador.org/wp-content/uploads/2022/05/Guia_1.pdf
- Khan, A., Khan, S., Khan, A., y Alam, M. (2017). Soil contamination with cadmium, consequences and remediation using organic amendments. *Science of The Total Environment*, 601-602, 1591–1605.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969717314341>

- Maddela, N., Kakarla, D., García, L., Chakraborty, S., Venkateswarlu, K., y Megharaj, M. (2020). Cocoa-laden cadmium threatens human health and cacao economy: A critical view. *Science of The Total Environment*, 720, 137645. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137645>
- Mahar, A., Ali, S., Arshad, M. y Shah, SMK (2022). Fitorremediación de metales pesados: avances recientes y perspectivas futuras. *Journal of Environmental Management*, 301, 113812.
- Márquez, J., Valdés, A., García, C., Rodríguez, H., Gamboa, J., y Luna, L. (2020). Evaluation of the synergistic effects of chromium and lead during the process of phytoremediation with watercress (*Nasturtium officinale*) in an artificial wetland. *Biotechnia*, 22(2), 171–178. <https://doi.org/10.18633/biotechnia.v22i2.1259>
- Martelli, A., Vanina, T., Belén, M., y Rubilar, T. (2024). Fitorremediación de efluentes acuícolas mediante el uso de seis microalgas marinas: aportes de sustentabilidad en la industria acuícola del erizo de mar en Argentina. *Revista de Biología Tropical*, 72(51), 2215-2075. <https://pesquisa.bvsalud.org/portal/resource/pt/biblio-1559331>
- Méndez, N., Parrado, C., y Henríquez, L. (2020). *Procesos de fitorremediación en suelos contaminados con cadmio: Revisión de literatura* [Tesis de pregrado, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano]. Repositorio Institucional. <https://bdigital.zamorano.edu/items/38ebe818-2ebb-4eae-a725-6c3fd5d4bdd1>
- Meter, A., Atkinson, R., Laliberte, B. (2019). Cadmio en el cacao de América Latina y el Caribe. Análisis de la investigación y soluciones potenciales para la mitigación. *Biodiversity-International*. <https://hdl.handle.net/10568/102354>
- Nieves, Y., Parra, N., Villanueva, S., y Henríquez, M. (2019). Tech note: bioremediation, enemy of cadmium. *Revista INGENIERÍA UC*, 26(1), 96-104. https://www.redalyc.org/journal/707/70758484010/html/#redalyc_70758484010_ref11
- Núñez, M. (2022). Aplicación de técnicas de fitorremediación en suelos contaminados con plomo y cadmio. *Conciencia Digital*, 5(1.3), 6-25. <https://doi.org/10.33262/concienciadigital.v5i1.3.2089>
- Oc, W., Gonza, C., Guzmán, W., y Pariente, E. (2018). Bioacumulación de cadmio en el cacao (*Theobroma cacao*) en la Comunidad Nativa de Pakun, Perú. *Revista Forestal del Perú*, 33(1), 63–75. <https://revistas.lamolina.edu.pe/index.php/rfp/article/view/1156>
- Pérez, M., Zorrilla, M., Domínguez, L., González, Y., y González, M. (2022). Determinación de los coeficientes de fitorremediación de cadmio y plomo en el Romerillo americano. *Revista Cubana de Química*, 34(3), 477 – 493.

- Pilon-Smits, EAH (2022). Fitorremediación. Revisión anual de biología vegetal , 73, 15-39
- Quispe, E. y Torres, R. (2024). *Remoción de metales pesados utilizando mucílago de cactus en la laguna Smelter de Cerro de Pasco, Perú – 2023* [Tesis de pregrado, Universidad Continental]. Repositorio Institucional UC. <https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/14752>
- Rivera, L., Rivera, H., y Rodríguez, I. (2024). Estudio Descriptivo del potencial fitorremediador de azolla, *Lemna Minor* y *Eichhornia Crassipes* en ambientes contaminados. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 8(3), 10303-10314. <https://ciencialatina.org/index.php/cienciala/article/view/12182>
- Santana, E., y Zambrano, L. (2022). *Determinación de metales pesados en el pimiento verde (Capsicum annuum L.) para la elaboración de una conserva en la ciudad de Calceta* [Tesis de pregrado, Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López]. Repositorio Institucional ESPAM. <https://repositorio.espam.edu.ec/handle/42000/1748>
- Sarwar, N., Imran, M., Alamri, SA y Al-Qurainy, F. (2023). Fitorremediación de metales pesados: avances recientes y perspectivas futuras. *Environmental Science and Pollution Research* , 30(1), 1-16.
- Song, Y., Jin, L., y Wang, X. (2017). Cadmium absorption and transportation pathways in plants. *International journal of phytoremediation*, 19(2), 133–141. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27409403/>
- Stylianou, M., Gavriel, I., Vogiatzakis, I., Zorpas, A., y Agapiou, A. (2020). Native plants for the remediation of abandoned sulphide mines in Cyprus: A preliminary assessment. *Journal of Environmental Management*, 274, 15 <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301479720304643#preview-section-references>
- Téllez, G. Reyes, F., y Reyes, R. (2023). Evaluación del desarrollo vegetativo de la especie *Caesalpinia vesicaria* L., empleando diferentes tratamientos a nivel de vivero en la Universidad Nacional Agraria. *Universidad Nacional Agraria*. <https://catalogosiidca.csuca.org/Record/UNANI.069097>
- Torres, Y., Rojas, A., Salas, W., e Hinojosa, R. (2021). Fitorremediación de suelos contaminados por metales pesados. *Centro de Investigación y Desarrollo Intelectual CIDI*, 1(1), 25-36. <https://srjournalcidi.org/index.php/ojs/article/view/43>
- Vega, L. (2021). Aplicación de métodos físico-químicos y biológicos en suelos contaminados con cadmio y plomo. *Universidad Nacional Hermilio Valdizán*.

<https://www.unheval.edu.pe/portal/aplicacion-de-metodos-fisico-quimicos-y-biologicos-en-suelos-contaminados-con-cadmio-y-plomo/>

- Velásquez, J., y Cobeña, H. (2022). Fitorremediación como alternativa en remoción de metales pesados del suelo: Una revisión teórica. *Revista Colón Ciencias, Tecnología y Negocios*, 9(2), 15–31. https://revistas.up.ac.pa/index.php/revista_colon_ctn/article/view/3104
- Villanueva, P. (2019). *Relación entre las características del suelo y la concentración de cadmio en los tejidos de la planta de cacao (Theobroma cacao L.) en Pumahuasi, Huánuco* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Hermilio Valdizán]. Repositorio Institucional. <https://hdl.handle.net/20.500.13080/5386>
- Zhang, Q., Yu, R., Fu, S., Wu, Z., Chen, H., y Liu, H. (2019). Spatial heterogeneity of heavy metal contamination in soils and plants in Hefei, China. *Scientific Reports*, 9(1), 1–8. <https://www.nature.com/articles/s41598-018-36582-y>

ANEXO

Anexo 1. Panel fotográfico



Figura 7. Vivero ubicado en la ciudad de Tingo María.



Figura 8. Unidad experimental T₁ (*Baltimora recta* L.)



Figura 10. Unidad experimental T₂ (*Hyptis mutabilis*(Rich.)Briq)



Figura 9. Unidad experimental T₃ (*Colocasia esculenta* L.)



Figura 11. Unidad experimental T₄ (*Cyperus rotundus* L.)



Figura 12. Unidad experimental T₅ (*Commelina fasciculata* R & P.)



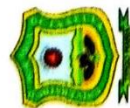
Figura 13. En la grabación de video para mi visita de jurado de tesis por motivo de pandemia COVID- 19



Figura 14. Muestras de suelo listas para ser llevadas a laboratorio.



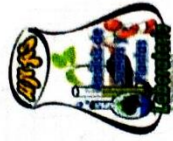
Figura 15. Muestras de plantas, listas para ser llevadas a laboratorio.



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

AV. UNIVERSITARIA S/N - TINGO MARIA - CELULAR 941531359

Facultad de Agronomía - Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología
analisisdesuelosunos@hotmail.com



ANÁLISIS DE SUELOS

SOLICITANTE:		IIAP						PROCEDENCIA:						RIO NEGRO - SUPTTE									
N°	COD. LAB.	DATOS DE LA MUESTRA		ANÁLISIS MECÁNICO			pH	M.O.	N	P	K	Cd disponible	Cd total	C/C	CAMBIABLES Cmol(+)/kg				Cice	%	%	%	
		Arena	Arcilla	Limo	Textura	Ca									Mg	K	Na	Al					H
1	S0053	38	17	45	Franco	5.04	1.55	0.08	5.95	84.96	2.24	4.45	--	6.06	1.48	--	--	0.40	0.10	8.03	93.78	6.223	4.98

MUESTREO POR EL SOLICITANTE
 RECIBO N° 0568339
 FECHA : 15/02/2019



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
 LAS ANAÑAJAS DE SUELOS

Ing. Luis C. Maysilla Mabaya
 JEFE

Figura 16. Resultados del laboratorio del análisis inicial de suelo.



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA TINGO MARÍA

FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES



CONSTANCIA

El que suscribe, profesor de Dendrología de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, deja constancia que las muestras dendrológicas que me ha mostrado Taype Camarena, Gris Rosario, corresponden a las especies siguientes:

Nombre Común	Nombre Científico	Familia
Pituquilla	<i>Colocosia esculenta</i> L.	ARECACEAE
Coquito	<i>Cyperus rotundus</i> L.	CYPERACEAE
Pasto corrugado	<i>Commelina fasciculata</i> R & P.	COMMELINACEAE
Yerbita	<i>Hyptis mutabilis</i> (Rich.) Briq.	LAMIACEAE
Baltimora	<i>Baltimora recta</i> L.	ASTERACEAE

Se expide la presente para los fines que considere conveniente.

Tingo María, 15 de octubre del 2024.

M.Sc. Warren Ríos García
 Profesor de Dendrología UNAS
 Reg. CIP: 43189

Figura 17. Constancia de reconocimiento de las plantas nativas trabajadas.



LASATINGO MARÍA

Laboratorio de Análisis de Suelos y Agua

A.V. Asunción Saldaña Lt. 34 Telf. 999250084 – 988094215 Correo: Lasatingomaria@gmail.com

RESULTADOS DEL ANALISIS DE CADMIO EN LOS SUELOS

SOLICITANTE : TAYPE CAMARENA GRIS ROSARIO
 PROCEDENCIA : RIO NEGRO-SUPTE
 REFERENCIAS : SUELO CONTAMINADO POR CADMIO
 FECHA DE MUESTREO : 25-02-2023
 MUESTREO : EL INTERESADO

N°	CODIGOS	DESCRIPCION DE LA MUESTRA	VALORES OBTENIDOS EN ppm
M ₁	T _{1,1}	suelo cultivado con <i>Baltimora recta</i> L	0.27
M ₂	T _{1,2}	suelo cultivado con <i>Baltimora recta</i> L	0.31
M ₃	T _{1,3}	suelo cultivado con <i>Baltimora recta</i> L	0.21
M ₄	T _{1,4}	suelo cultivado con <i>Baltimora recta</i> L	0.26
M ₅	T _{2,1}	suelo cultivado con <i>Hyptis mutabilis</i> (Rich.)Briq	0.20
M ₆	T _{2,2}	suelo cultivado con <i>Hyptis mutabilis</i> (Rich.)Briq	0.15
M ₇	T _{2,3}	suelo cultivado con <i>Hyptis mutabilis</i> (Rich.)Briq	0.21
M ₈	T _{2,4}	suelo cultivado con <i>Hyptis mutabilis</i> (Rich.)Briq	0.18
M ₉	T _{3,1}	suelo cultivado con <i>Colocasia esculenta</i> L.	0.16
M ₁₀	T _{3,2}	suelo cultivado con <i>Colocasia esculenta</i> L.	0.22
M ₁₁	T _{3,3}	suelo cultivado con <i>Colocasia esculenta</i> L.	0.18
M ₁₂	T _{3,4}	suelo cultivado con <i>Colocasia esculenta</i> L.	0.13
M ₁₃	T _{4,1}	suelo cultivado con <i>Cyperus rotundus</i> L	0.14
M ₁₄	T _{4,2}	suelo cultivado con <i>Cyperus rotundus</i> L	0.10
M ₁₅	T _{4,3}	suelo cultivado con <i>Cyperus rotundus</i> L	0.12
M ₁₆	T _{4,4}	suelo cultivado con <i>Cyperus rotundus</i> L	0.11
M ₁₇	T _{5,1}	suelo cultivado con <i>Commelina fassiculata</i> R &P.	0.15
M ₁₈	T _{5,2}	suelo cultivado con <i>Commelina fassiculata</i> R &P.	0.11
M ₁₉	T _{5,3}	suelo cultivado con <i>Commelina fassiculata</i> R &P.	0.10
M ₂₀	T _{5,4}	suelo cultivado con <i>Commelina fassiculata</i> R &P.	0.17
M ₂₁	T _{6,1}	suelo sin ninguna planta (control)	0,24
M ₂₂	T _{6,2}	suelo sin ninguna planta (control)	0,26
M ₂₃	T _{6,3}	suelo sin ninguna planta (control)	0,32
M ₂₄	T _{6,4}	suelo sin ninguna planta (control)	0,28



Oficina Tingo María: Asunción Saldaña Lt 34; Teléfono de consultas: #999250084, #988094215
 Correo: lasatingomaria@gmail.com

Figura 18. Resultado de laboratorio del análisis final de suelos de los tratamientos.



LASA TINGO MARÍA

Laboratorio de Análisis de Suelos y Agua

A.V. Asunción Saldaña Lt. 34 Telf. 999250084 – 988094215 Correo: Lasatingomaria@gmail.com

RESULTADOS DEL ANALISIS DE CADMIO EN LAS PLANTAS (PARTE AEREA)

SOLICITANTE : TAYPE CAMARENA GRIS ROSARIO
 PROCEDENCIA : RIO NEGRO-SUPTTE
 REFERENCIAS : SUELO CONTAMINADO POR CADMIO
 FECHA DE MUESTREO : 25-02-2023
 MUESTREO : EL INTERESADO

N°	CODIGOS	DESCRIPCION DE LA MUESTRA	VALORES OBTENIDOS EN ppm
M ₁	T _{1,1}	<i>Baltimora recta</i> L (parte aérea)	0.08
M ₂	T _{1,2}	<i>Baltimora recta</i> L (parte aérea)	0.12
M ₃	T _{1,3}	<i>Baltimora recta</i> L (parte aérea)	0.07
M ₄	T _{1,4}	<i>Baltimora recta</i> L (parte aérea)	0.05
M ₅	T _{2,1}	<i>Hyptis mutabilis</i> (Rich.)Briq (parte aérea)	0.09
M ₆	T _{2,2}	<i>Hyptis mutabilis</i> (Rich.)Briq (parte aérea)	0.07
M ₇	T _{2,3}	<i>Hyptis mutabilis</i> (Rich.)Briq (parte aérea)	0.13
M ₈	T _{2,4}	<i>Hyptis mutabilis</i> (Rich.)Briq (parte aérea)	0.07
M ₉	T _{3,1}	<i>Colocasia esculenta</i> L. (parte aérea)	0.06
M ₁₀	T _{3,2}	<i>Colocasia esculenta</i> L. (parte aérea)	0.05
M ₁₁	T _{3,3}	<i>Colocasia esculenta</i> L. (parte aérea)	0.08
M ₁₂	T _{3,4}	<i>Colocasia esculenta</i> L. (parte aérea)	0.10
M ₁₃	T _{4,1}	<i>Cyperus rotundus</i> L. (parte aérea)	0.05
M ₁₄	T _{4,2}	<i>Cyperus rotundus</i> L. (parte aérea)	0.09
M ₁₅	T _{4,3}	<i>Cyperus rotundus</i> L. (parte aérea)	0.07
M ₁₆	T _{4,4}	<i>Cyperus rotundus</i> L. (parte aérea)	0.04
M ₁₇	T _{5,1}	<i>Commelina fassiculata</i> R &P. (parte aérea)	0.07
M ₁₈	T _{5,2}	<i>Commelina fassiculata</i> R &P. (parte aérea)	0.11
M ₁₉	T _{5,3}	<i>Commelina fassiculata</i> R &P. (parte aérea)	0.04
M ₂₀	T _{5,4}	<i>Commelina fassiculata</i> R &P. (parte aérea)	0.03



Oficina Tingo María: Asunción Saldaña Lt 34; Teléfono de consultas: #999250084, #988094215
 Correo: lasatingomaria@gmail.com

Figura 19. Resultado de laboratorio del análisis final de las plantas nativas (parte aérea).



LASA TINGO MARÍA

Laboratorio de Análisis de Suelos y Agua

A.V. Asunción Saldaña Lt. 34 Telf. 999250084 – 988094215 Correo: Lasatingomaria@gmail.com

RESULTADOS DEL ANALISIS DE CADMIO EN LAS PLANTAS (RAICES)

SOLICITANTE : TAYPE CAMARENA GRIS ROSARIO
 PROCEDENCIA : RIO NEGRO-SUPTTE
 REFERENCIAS : SUELO CONTAMINADO POR CADMIO
 FECHA DE MUESTREO : 25-02-2023
 MUESTREADO : EL INTERESADO

N°	CODIGOS	DESCRIPCION DE LA MUESTRA	VALORES OBTENIDOS EN ppm
M ₁	T _{1,1}	<i>Baltimora recta</i> L (Raiz)	0.10
M ₂	T _{1,2}	<i>Baltimora recta</i> L (Raiz)	0.14
M ₃	T _{1,3}	<i>Baltimora recta</i> L (Raiz)	0.07
M ₄	T _{1,4}	<i>Baltimora recta</i> L (Raiz)	0.10
M ₅	T _{2,1}	<i>Hyptis mutabilis</i> (Rich.)Briq (Raiz)	0.09
M ₆	T _{2,2}	<i>Hyptis mutabilis</i> (Rich.)Briq (Raiz)	0.13
M ₇	T _{2,3}	<i>Hyptis mutabilis</i> (Rich.)Briq (Raiz)	0.12
M ₈	T _{2,4}	<i>Hyptis mutabilis</i> (Rich.)Briq (Raiz)	0.07
M ₉	T _{3,1}	<i>Colocasia esculenta</i> L. (Raiz)	0.11
M ₁₀	T _{3,2}	<i>Colocasia esculenta</i> L. (Raiz)	0.14
M ₁₁	T _{3,3}	<i>Colocasia esculenta</i> L. (Raiz)	0.08
M ₁₂	T _{3,4}	<i>Colocasia esculenta</i> L. (Raiz)	0.12
M ₁₃	T _{4,1}	<i>Cyperus rotundus</i> L. (Raiz)	0.10
M ₁₄	T _{4,2}	<i>Cyperus rotundus</i> L. (Raiz)	0-09
M ₁₅	T _{4,3}	<i>Cyperus rotundus</i> L. (Raiz)	0.13
M ₁₆	T _{4,4}	<i>Cyperus rotundus</i> L. (Raiz)	0.08
M ₁₇	T _{5,1}	<i>Commelina fassiculata</i> R &P. (Raiz)	0.09
M ₁₈	T _{5,2}	<i>Commelina fassiculata</i> R &P. (Raiz)	0.12
M ₁₉	T _{5,3}	<i>Commelina fassiculata</i> R &P. (Raiz)	0.08
M ₂₀	T _{5,4}	<i>Commelina fassiculata</i> R &P. (Raiz)	0.07

LABORATORIO DE ANALISIS DE SUELOS Y AGUA
 LASA TINGO MARÍA
 HUANUCO
 Ing. Arzu Sabino, Daniel André
 JEFE DE LABORATORIO
 CIP N° 43326

Oficina Tingo María: Asunción Saldaña Lt 34; Teléfono de consultas: #999250084, #988094215
 Correo: lasatingomaria@gmail.com

Figura 20. Resultado de laboratorio del análisis final de las plantas nativas (parte radicular).