

**UNIVERSIDAD NACIONAL
TORIBIO RODRÍGUEZ DE MENDOZA DE AMAZONAS**



ESCUELA DE POSGRADO

**TESIS PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE MAESTRO
EN GESTIÓN PARA EL DESARROLLO SUSTENTABLE**

**FITORREMEDIACIÓN DE CADMIO CON ESPECIES
HERBÁCEAS EN DIFERENTES TIPOS DE SUELO EN
CONDICIONES DE INVERNADERO, AMAZONAS**

Autor (a): Bach. Nuri Carito Vilca Valqui

Asesor: Dr. Segundo Manuel Oliva Cruz

Registro:

CHACHAPOYAS - PERÚ

2022

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN DE LA TESIS EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL DE LA UNTRM



ANEXO 6-H

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN DE LA TESIS DE MAestrÍA (X)/DOCTORADO () EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL DE LA UNTRM

1. Datos de autor 1

Apellidos y nombres (tener en cuenta las tildes): Vilca Valqui Muri Carito
 DNI N°: 7282389
 Correo electrónico: muri.vilca.epg@untrm.edu.pe
 Nombre de la Maestría (X) / Doctorado (): Gestión para el Desarrollo Sustentable

Datos de autor 2

Apellidos y nombres (tener en cuenta las tildes): _____
 DNI N°: _____
 Correo electrónico: _____
 Nombre de la Maestría () / Doctorado (): _____

2. Título de la tesis para obtener el grado académico de Maestro (X) / Doctor ()

Fitorremediación de mdmna con especies herbáceas en diferentes tipos de suelo en condiciones de invernadero, Amazonas

3. Datos de asesor 1

Apellidos y nombres: Dr. Oliva Cruz Segundo Manuel
 DNI, Pasaporte, C.E N°: 05374749
 Open Research and Contributor-ORCID (<https://orcid.org/0000-0002-9670-0970>) (<https://orcid.org/0000-0002-9670-0970>)

Datos de asesor 2

Apellidos y nombres: _____
 DNI, Pasaporte, C.E N°: _____
 Open Research and Contributor-ORCID (<https://orcid.org/0000-0002-9670-0970>)



4. Campo del conocimiento según Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos- OCDE (ejemplo: Ciencias médicas, Ciencias de la Salud-Medicina básica-Immunología)

https://catalogos.concytec.gob.pe/vocabulario/ocde_ford.html
1.05.00. Ciencias de la Tierra, Ciencias ambientales; 1.05.08. Ciencias del medio ambiente, 2.08.00. Biotecnología ambiental; 2.08.02. Biorremediación, Biotecnologías de diagnóstico en la

5. Originalidad del Trabajo gestión ambiental.

Con la presentación de esta ficha, el(la) autor(a) o autores(as) señalan expresamente que la obra es original, ya que sus contenidos son producto de su directa contribución intelectual. Se reconoce también que todos los datos y las referencias a materiales ya publicados están debidamente identificados con su respectivo crédito e incluidos en las notas bibliográficas y en las citas que se destacan como tal.

6. Autorización de publicación

El(los) titular(es) de los derechos de autor otorga a la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas (UNTRM), la autorización para la publicación del documento indicado en el punto 2, bajo la *Licencia creative commons* de tipo BY-NC: Licencia que permite distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir de su obra de forma no comercial por lo que la Universidad deberá publicar la obra poniéndola en acceso libre en el repositorio institucional de la UNTRM y a su vez en el Registro Nacional de Trabajos de Investigación -RENATI, dejando constancia que el archivo digital que se está entregando, contiene la versión final del documento sustentado y aprobado por el Jurado Evaluador.

Firma del autor 1

Chachapoyas, 27, diciembre, 2022

Firma del autor 2

Firma del Asesor 1

Firma del Asesor 2

DEDICATORIA

A mi hija Zara Aurora Gómez Vilca; mis padres Francisco Vilca, Rosa Aurora Valqui y mi hermana Lucy Azucena Vilca, a mi compañero de vida Oscar Arturo que gracias a su apoyo, consejos e inspiración han hecho posible que siga creciendo profesionalmente.

A mis amigos, compañeros y docentes quienes me apoyaron durante todo el transcurso de mis estudios.

A la memoria de la Dr. Cástula Alvarado Chuqui, mi asesora, que desde un inicio me estuvo apoyando profesionalmente.

AGRADECIMIENTO

A Dios por guiarme en mi camino y por permitirme concluir con un objetivo más de mi vida profesional y por darme unos padres, que con su apoyo incondicional y los valores que me brinda, han hecho que siga cumpliendo mis metas.

A la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas, por su contribución a mi formación profesional con docentes bien capacitados que fue de importancia para mi desarrollo profesional.

Al Fondo Nacional de Desarrollo Científico, Tecnológico y de Innovación Tecnológica (FONDECYT) por el financiamiento de esta investigación a través del Proyecto con Contrato N° 366-2019-FONDECYT " Fitoextracción de cadmio con hierba mora (*Solanum nigrum* L.) En suelos cultivados con cacao (*Theobroma cacao* L.) en Amazonas" – FITOCD, ejecutado por el Instituto de Investigación para el Desarrollo Sustentable de Ceja de Selva (INDES CES).

Al asesor Dr. Segundo Manuel Oliva Cruz, por su paciencia y sus conocimientos que me fueron brindados para poder realizar esta investigación.

A los docentes miembros del jurado, Ph.D. Ligia Magali García Rosero, Mg. Eli Pariente Mondragón Y Mg. Segundo Grimaldo Chávez Quintana, por sus aportes y recomendaciones durante la fase inicial y final del proyecto de tesis, haciendo que tenga impacto la investigación.

A los ingenieros y amigos: Nilton Beltrán Rojas Briceño, Jegnes Benjamín Meléndez Mori, Juan Carlos Nery Chávez, José Jesús Tejada Alvarado, Marielita Arce Inga, Damaris Leiva Tafur, Jessy Patricia Arista Bustamante, Rosmery Ayala Tocto; A los técnicos Edith Calderón Ordoñez y Elder Chichipe Vela; al Blg. Jesús Rascón Barrios; por todo el apoyo incondicional que me brindaron para la ejecución de este proyecto de investigación.

**AUTORIDADES DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL TORIBIO RODRÍGUEZ
DE MENDOZA**

JORGE LUIS MAICELO QUINTANA Ph.D.
Rector

DR. OSCAR ANDRÉS GAMARRA TORRES
Vicerrector Académico

Dra. MARÍA NELLY LUJÁN ESPINOZA
Vicerrectora de Investigación

Dr. EFRAIN MANUELITO CASTRO ALAYO
Director de la Escuela de Posgrado

VISTO BUENO DEL ASESOR DE LA TESIS



UNTRM

REGLAMENTO GENERAL
PARA EL OTORGAMIENTO DEL GRADO ACADÉMICO DE
BACHILLER, MAESTRO O DOCTOR Y DEL TÍTULO PROFESIONAL

ANEXO 6-L

VISTO BUENO DEL ASESOR DE TESIS PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE MAESTRO (X)/ DOCTOR ()

El que suscribe el presente, docente de la UNTRM (X)/Profesional externo (), hace constar que ha asesorado la realización de la Tesis titulada Fitorremediación de Cadmio con especies herbáceas en diferentes tipos de suelo en condiciones de invernadero, Amazonas; cuyo autor Nuri Carito Vilca Valqui es estudiante del IV ciclo/egresado () de la Escuela de Posgrado, Maestría (X)/ Doctorado () en Gestión para el Desarrollo Sustentable con correo electrónico institucional nuri.vilca.epg@untrm.edu.pe

El suscrito da el Visto Bueno a la Tesis mencionada, dándole pase para que sea sometida a la revisión por el Jurado Evaluador, comprometiéndose a supervisar el levantamiento de observaciones que formulen en Acta en conjunto, y estar presente en la sustentación.

Chachapoyas, 06 de Julio de 2022

Firma y nombre completo del Asesor


Segundo Manuel Oliva Cruz
DNI 05374749.



JURADO EVALUADOR DE LA TESIS



Ligia Magali García Rosero, Ph. D.

Presidente



Eli Pariente Mondragón, M. Sc.

Secretario



Mg. Segundo Grimaldo Chávez Quintana

Vocal

CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD DE LA TESIS



ANEXO 6-Q

CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD DE LA TESIS PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE MAESTRO (X) / DOCTOR ()

Los suscritos, miembros del Jurado Evaluador de la Tesis titulada:

Fitorremediación de cadmio con especies herbáceas en diferentes tipos de suelo en condiciones de invernadero, Amazonas

presentada por el estudiante () / egresado (X) _____

de la Escuela de Posgrado, Maestría (X) / Doctorado () en Gestión para el Desarrollo Sustentable

con correo electrónico institucional nuri.vilca.epg@untrm.edu.pe

después de revisar con el software Turnitin el contenido de la citada Tesis, acordamos:

- a) La citada Tesis tiene 16 % de similitud, según el reporte del software Turnitin que se adjunta a la presente, el que es menor (X) / igual () al 25% de similitud que es el máximo permitido en la UNTRM.
- b) La citada Tesis tiene _____ % de similitud, según el reporte del software Turnitin que se adjunta a la presente, el que es mayor al 25% de similitud que es el máximo permitido en la UNTRM, por lo que el aspirante debe revisar su Tesis para corregir la redacción de acuerdo al Informe Turnitin que se adjunta a la presente. Debe presentar al Presidente del Jurado Evaluador su Tesis corregida para nueva revisión con el software Turnitin.

Chachapoyas, 25 de octubre del 2022




SECRETARIO


PRESIDENTE


VOCAL

OBSERVACIONES:

.....
.....

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE LA TESIS



ANEXO 6-5

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE MAESTRO (X) / DOCTOR ()

En la ciudad de Chachapoyas, el día 08 de noviembre del año 2022, siendo las 11:00 horas, el aspirante Nuri Carito Vilca Valqui, Asesorado por Dr. Segundo Manuel Oliva Cruz, defiende en sesión pública presencial (X) / a distancia () la Tesis titulada: Fitorremediación de cadmio con especies herbáceas en diferentes tipos de suelo en condiciones de invernadero, Amazonas, para obtener el Grado Académico de Maestro (X)/Doctor () en Gestión para el desarrollo sustentable, a ser otorgado por la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas; ante el Jurado Evaluador, conformado por:

Presidente: Ph.D. Ligia Magali García Rosero

Secretario: Mg. Eli Pariente Mondragón

Vocal: Mg. Segundo Grimaldo Chávez Quintana

Procedió el aspirante a hacer la exposición de la Introducción, Material y método, Resultados, Discusión y Conclusiones, haciendo especial mención de sus aportaciones originales. Terminada la defensa de la Tesis presentada, los miembros del Jurado Evaluador pasaron a exponer su opinión sobre la misma, formulando cuantas cuestiones y objeciones consideraron oportunas, las cuales fueron contestadas por el aspirante.

Tras la intervención de los miembros del Jurado Evaluador y las oportunas respuestas del aspirante, el Presidente abre un turno de intervenciones para los presentes en el acto de sustentación, para que formulen las cuestiones u objeciones que consideren pertinentes.

Seguidamente, a puerta cerrada, el Jurado Evaluador determinó la calificación global concedida a la sustentación de la Tesis de Maestría (X)/Doctorado (), en términos de:

A probado (X) por Unanimidad (X) / Mayoría () Desaprobado ()

Otorgada la calificación, el Secretario del Jurado Evaluador lee la presente Acta en esta misma sesión pública. A continuación se levanta la sesión.

Siendo las 11:40 horas del mismo día y fecha, el Jurado Evaluador concluye el acto de sustentación de la Tesis para obtener el Grado Académico de Maestro (X)/Doctor ().


SECRETARIO


PRESIDENTE


VOCAL

OBSERVACIONES:

ÍNDICE DE CONTENIDO GENERAL

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN DE LA TESIS EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL DE LA UNTRM	ii
DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTO	iv
AUTORIDADES DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL TORIBIO RODRÍGUEZ DE MENDOZA	v
VISTO BUENO DEL ASESOR DE LA TESIS	vi
JURADO EVALUADOR DE LA TESIS	vii
CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD DE LA TESIS	viii
ACTA DE SUSTENTACIÓN DE LA TESIS	ix
ÍNDICE DE CONTENIDO GENERAL	x
ÍNDICE DE TABLAS	xii
ÍNDICE DE FIGURAS	xiii
RESUMEN	xiv
ABSTRACT	xv
I. INTRODUCCIÓN	16
II. MATERIAL Y MÉTODOS	18
2.1. Ubicación del estudio	18
2.2. Diseño de la investigación	19
2.3. Proceso metodológico	21
2.3.1. Identificación taxonómica de las especies herbáceas.	21
2.3.2. Preparación de los dos sustratos	21
2.3.3. Instalación del experimento	22
2.3.4. Determinación de Cd en partes vegetales de las especies herbáceas	22
2.3.5. Análisis de cadmio en suelo	23
2.4. Análisis de investigadores respecto al tema	23
2.5. Análisis de datos	24
III. RESULTADOS	25
3.1. Determinación de parámetros morfológicos y fisiológicos de las especies herbáceas (hierba mora, cadillo) fitorremediadoras	25
3.1.1. Características morfológicas	25
3.1.2. Variables fisiológicas	28

3.2.	Factores de translocación y de bioacumulación de las especies herbáceas	29
3.3.	Nivel de fitorremediación con las especies herbáceas	32
3.4.	Consecuencias de la concentración de Cd en el cultivo de cacao y sobre fitorremediación	35
3.4.1.	Percepción sobre la contaminación de cadmio en el cacao.....	35
3.4.2.	Estrategias para minimizar la concentración de cadmio.....	35
3.4.3.	Fitorremediación sobre el uso de especies herbáceas.....	36
IV.	DISCUSIÓN.....	37
V.	CONCLUSIONES.....	40
VI.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	41
VII.	ANEXOS	48

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tratamientos instalados en la investigación.	20
Tabla 2. Caracterización de los dos sustratos utilizados para la investigación.	21
Tabla 3. Análisis de varianza para variables morfológicas (parte foliar).	25
Tabla 4. Análisis de varianza para variables morfológicas (parte radicular)..	27
Tabla 5. Análisis de varianza para las variables fisiológicas.....	28
Tabla 6. Análisis de varianza para la concentración final de Cd en los dos sustratos...	30

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación del área de estudio, invernadero de la UNTRM.	18
Figura 2. Temperatura y humedad del invernadero de la UNTRM.	19
Figura 3. Distribución de los tratamientos en la investigación.	20
Figura 4. Procedimiento de análisis de cadmio plantas.	23
Figura 5. Concentración de Cd en la parte foliar y radicular.	29
Figura 6. Factor de bioacumulación de las dos especies herbáceas en diferentes sustratos.	31
Figura 7. Factor de translocación en las dos especies herbáceas.	32
Figura 8. Correlación entre los parámetros morfo-fisiológicos y concentraciones de Cd evaluados en el cadillo.....	33
Figura 9. Correlación entre los parámetros morfo-fisiológicos y concentraciones de Cd evaluados en la hierba mora.	34
Figura 10. Efectos que produce el Cd en el aspecto ambiental, económico y social. ...	35
Figura 11. Instalación del experimento en el invernadero de la UNTRM.	50
Figura 12. Limpieza de las partes vegetales.	50
Figura 13. Calcinado de las muestras en una mufla.	51
Figura 14. Preparación de las muestras, para ser corridos en el espectrofotómetro.....	51

RESUMEN

El cadmio es un metal que afectan los recursos naturales, plantas y seres humanos. Ante ello, se ha buscado diferentes métodos para mitigar el problema, uno de ellos es la fitorremediación que hace uso de especies que tienen el potencial de acumular el metal pesado en sus tejidos vegetales, además de ello es alternativa amigable con el ambiente. Esta investigación tuvo por objetivo evaluar la capacidad de fitorremediación de cadmio en dos especies herbáceas con diferentes sustratos en condiciones de invernadero. Se utilizó dos especies herbáceas, el cadillo (*Bidens pilosa* L.) y la hierba mora (*Solanum sp.*), que fueron sembradas en dos tipos de sustrato con pH 6.27 y 5.53, agregando diferentes concentraciones de cloruro de cadmio (0, 5 y 10 ppm) dentro de un invernadero; se tuvo 12 tratamientos con 5 repeticiones, teniendo así 60 unidades experimentales. Se evaluó parámetros morfológicos, fisiológicas y concentraciones de cadmio en las especies herbáceas y el sustrato. En los resultados obtenidos el cadillo sembrado en el sustrato con pH 5.53 con 10 ppm CdCl₂ tuvo mayor altura con 27.18 cm, con 19 brotes en peso fresco foliar 26.70 g y peso seco foliar 5.77 g; mientras que en las variables evaluadas de raíz la hierba mora tuvo mayor peso fresco con 20 g, peso seco 2.57, el longitud con 35.80 y en número de raíces con 23.80; en las variables fisiológicas, el índice de clorofila y conductancia estomática el cadillo tuvo el mayor resultado con 62.79 y 488.02 respectivamente, en el sustrato donde no se aplicó CdCl₂; en la acumulación de cd en la planta el cadillo acumuló 4.12 ppm en la parte foliar y la hierba mora 2.12 en la parte radicular. El factor de bioacumulación y de transferencia indican que ambas especies son plantas hiperacumuladoras y que en pH mayores tienden a acumular más Cd. En conclusión, la fitorremediación con estas 2 especies herbáceas es una alternativa óptima, es una técnica sostenible.

Palabras clave: bioacumulación, *Solanum sp.*, *Bidens pilosa* L., sostenibilidad, concentración, fisiología.

ABSTRACT

Cadmium is a metal that affects natural resources, plants and human beings. Therefore, different methods have been sought to mitigate the problem, one of them is phytoremediation, which makes use of species that have the potential to accumulate the heavy metal in their plant tissues, besides being an environmentally friendly alternative. The objective of this research was to evaluate the phytoremediation capacity of cadmium in two herbaceous species with different substrates under greenhouse conditions. Two herbaceous species, cadmium cadmium (*Bidens pilosa* L.) and blackberry (*Solanum sp.*), were planted in two types of substrates with pH 6.27 and 5.53, adding different concentrations of cadmium chloride (0, 5 and 10 ppm) in a greenhouse; there were 12 treatments with 5 replicates, thus having 60 experimental units. Morphological and physiological parameters and cadmium concentrations were evaluated in the herbaceous species and the substrate. In the results obtained, the cadillo sown in the substrate with pH 5.53 with 10 ppm CdCl₂ had greater height with 27.18 cm, with 19 shoots in foliar fresh weight 26.70 g and foliar dry weight 5.77 g; while in the evaluated variables of root the blackberry grass had greater fresh weight with 20 g, dry weight 2.57, length with 35.80 and in number of roots with 23. 80; in the physiological variables, chlorophyll index and stomatal conductance, cadillo had the highest result with 62.79 and 488.02 respectively, in the substrate where CdCl₂ was not applied; in the accumulation of cd in the plant, cadillo accumulated 4.12 ppm in the foliar part and blackberry herb 2.12 in the root part. The bioaccumulation and transfer factor indicate that both species are hyperaccumulating plants and that at higher pH they tend to accumulate more Cd. In conclusion, phytoremediation with these two herbaceous species is an optimal alternative and a sustainable technique.

Key words: bioaccumulation, *Solanum sp.*, *Bidens pilosa* L., sustainability, concentration, physiology.

I. INTRODUCCIÓN

El cadmio (Cd) es considerado como el metal con mayor peligro para el ambiente (Ismael et al., 2019) ya que se encuentra abundantemente distribuido (Kubier et al., 2019); se libera al ambiente a través de actividades antropogénicas (Rizwan et al., 2018), como el descarte de desechos urbanos, la minería, la producción de metales y el uso de fertilizantes de fosfato sintético (Haider et al., 2021).

Las concentraciones altas, provocan efectos dañinos en el ecosistema (Rodríguez et al., 2019); en los seres humanos estos efectos son causados por la ingestión de alimentos y agua contaminadas (Genchi et al., 2020); en el suelo, el Cd se almacena y se transfiere a la cadena alimentaria a través de las plantas (Adrees et al., 2015). Las plantas absorben fácilmente los iones de Cd en hojas, frutos y semillas comestibles a través de sus raíces (Shaari et al., 2022); lo que causa en las plantas también es la inhibición de varios procesos fisiológicos, incluida la germinación y el crecimiento, la fotosíntesis y la antioxidación (Zhu et al., 2020), reduciendo así la productividad (Mahajan & Kaushal, 2018). Para minimizar la toxicidad del Cd, las plantas adoptan varios mecanismos celulares y moleculares (Song et al., 2017), los principales mecanismos de desintoxicación son la exclusión y acumulación de Cd en partes específicas del tejido vegetal (Rasafi et al., 2020).

En ese contexto, existe una necesidad urgente de encontrar una manera eficaz de mitigar los riesgos de Cd. Por ello, hay diversas técnicas convencionales como el métodos físicos, biológicos y químicos, que también pueden usarse en combinación (Zhi et al., 2020).

En el método físico se utilizan tecnologías como reparación analítica térmica, la reparación de vitrificación y la reparación eléctrica, que no cambia las propiedades químicas de los contaminantes (Han, 2019). El método químico se utiliza productos químicos o solventes a los suelos contaminados para estabilizar los contaminantes y convertirlos en formas menos tóxicas inofensivas para el ambiente (Koul & Taak, 2018). El método de biorremediación usa tecnología de fitorremediación, tecnología de remediación microbiana, tecnología de reparación animal y reparación conjunta (fitorremediación con agentes quelantes, remediación microbiana) (Huang et al., 2020).

La fitorremediación, hace el uso de plantas para tratar y controlar los desechos en forma natural (McCutcheon y Jorgensen, 2008); es una alternativa económica y eficiente para reducir la contaminación ambiental de manera sostenible (Riaz et al., 2022); es indispensable mejorar la comprensión de los mecanismos de la acumulación y tolerancia de metales pesados en las plantas (Yan et al., 2020), como optimizar la biodisponibilidad de metales pesados y aumentar la biomasa vegetal, por ejemplo, aplicando agentes quelantes y acidificantes para aumentar la disponibilidad de metales (Guo et al., 2019). Por ello, una alternativa son las especies herbáceas, ya que son de crecimiento rápido y producen una gran biomasa, además son fáciles de propagar y de crecimiento rápido (Matanzas et al., 2021).

Existen diversas especies herbáceas que tienen estas características, como *Bidens pilosa* L. que es una especie hiperacumuladora de Cd ampliamente distribuida en el mundo con gran biomasa y rápida tasa de crecimiento (Dai et al., 2021). También *Solanum nigrum* L., tiene la capacidad para tolerar y crecer en suelos con altas concentraciones de Cd (Pisco et al., 2018).

Por lo expuesto, esta investigación tuvo por objetivo evaluar la capacidad de fitorremediación de cadmio por estas dos especies herbáceas en dos diferentes sustratos, en condiciones de invernadero, en el departamento de Amazonas.

Para lo cual, los objetivos específicos establecidos fueron: a) Determinar los parámetros morfológicos y fisiológicos de las 2 especies herbáceas en 2 tipos de sustratos b) Determinar los factores de translocación y de bioacumulación de las especies herbáceas en 2 tipos de sustrato c) Correlacionar los parámetros morfológicos, fisiológicos con las concentraciones de Cd en las especies herbáceas y d) Analizar las consecuencias de concentraciones de Cd en el cultivo de cacao.

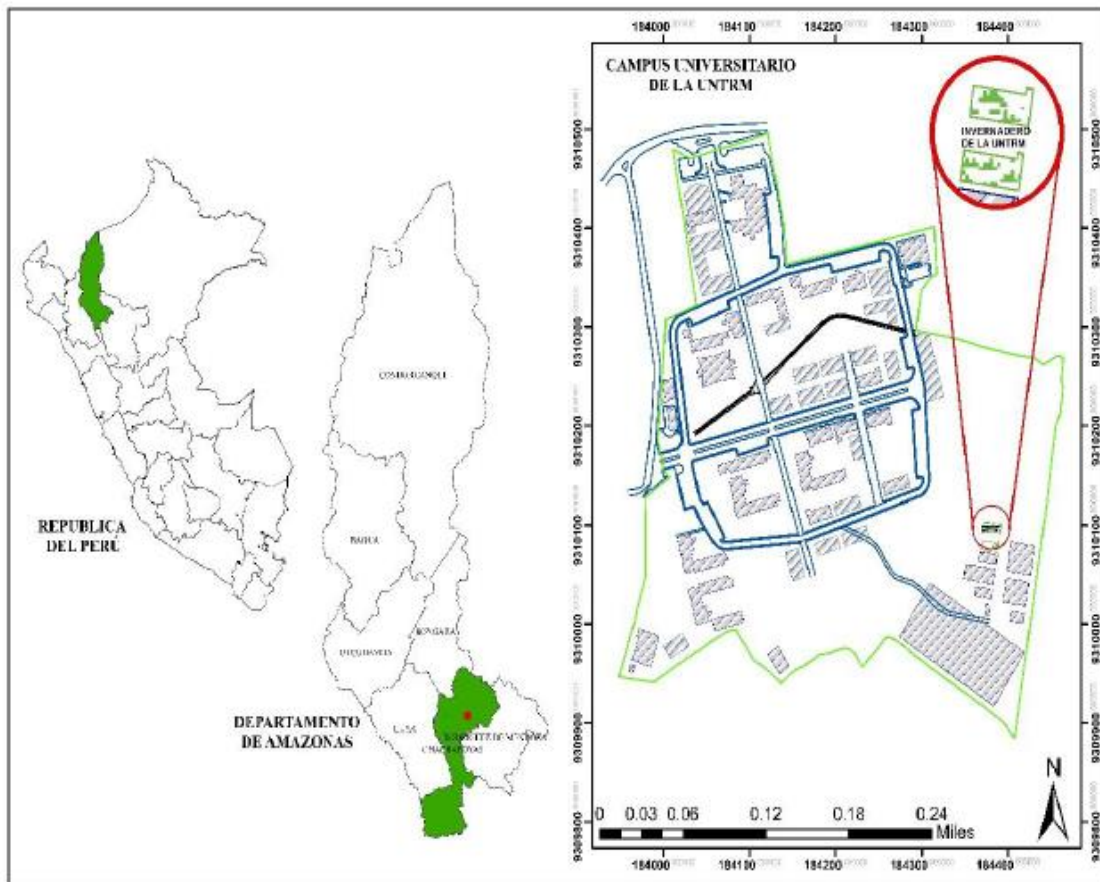
II. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Ubicación del estudio

La investigación se ejecutó en el invernadero de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Chachapoyas (Figura 1) ($6^{\circ} 14' 0.06''$ latitud sur, $77^{\circ} 51' 6.81''$ longitud oeste y altitud de 2328 msnm).

Figura 1.

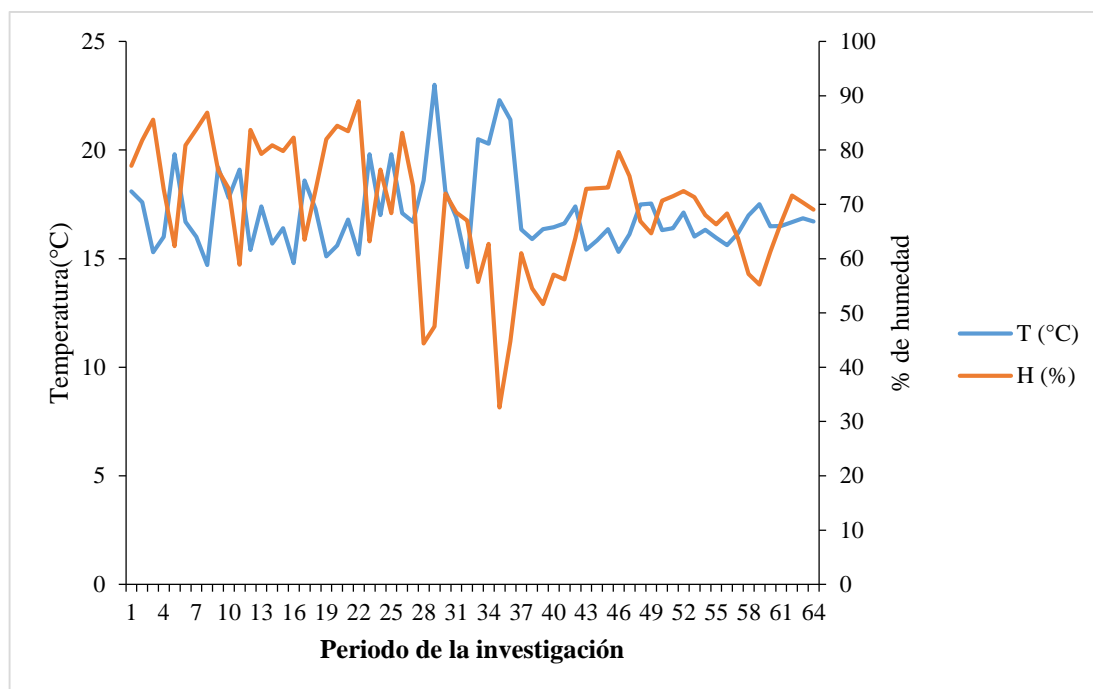
Ubicación del área de estudio, invernadero de la UNTRM.



Los valores de humedad y temperatura del invernadero, se registraron periódicamente con una data Logger (Elitech), durante la duración de la investigación. En temperatura el valor mínimo registrado 14.6°C y máximo 23°C ; respecto a humedad el mínimo fue de 32.6 y máximo de 89 % (Figura 2).

Figura 2.

Temperatura y humedad del invernadero de la UNTRM.



2.2. Diseño de la investigación

La investigación es de carácter experimental, siendo un Diseño Completamente al Azar (DCA); Teniendo como factores las especies (2A), tipo de sustrato (2B) y las concentraciones de cadmio (3C). Por tanto, se tuvo 12 tratamientos (Tabla 1) con 5 repeticiones por tratamientos y 60 unidades experimentales.

Tabla 1.

Tratamientos instalados en la investigación.

Especies	Tipo de sustrato	Concentraciones de Cd	Tratamientos
A ₁	B ₁	C ₁	T1= A ₁ B ₁ C ₁
A ₁	B ₁	C ₂	T2 = A ₁ B ₁ C ₂
A ₁	B ₁	C ₃	T3= A ₁ B ₁ C ₃
A ₁	B ₂	C ₁	T4= A ₁ B ₂ C ₁
A ₁	B ₂	C ₂	T5 = A ₁ B ₂ C ₂
A ₁	B ₂	C ₃	T6 = A ₁ B ₂ C ₃
A ₂	B ₁	C ₁	T7= A ₂ B ₁ C ₁
A ₂	B ₁	C ₂	T8= A ₂ B ₁ C ₂
A ₂	B ₁	C ₃	T9= A ₂ B ₁ C ₃
A ₂	B ₂	C ₁	T10 = A ₂ B ₂ C ₁
A ₂	B ₂	C ₂	T11= A ₂ B ₂ C ₂
A ₂	B ₂	C ₃	T12= A ₂ B ₂ C ₃

Diseño de los tratamientos 2A x 2B x 3C, variedades = A1: Cadillo, A2: Hierba mora; tipo de sustrato = B1: S1 (1 arena: 1 turba: 1 tierra agrícola), B2: S2 (1/2 arena: 1 turba: 1 tierra agrícola); concentraciones de cadmio=C1: 0ppm, C2: 5 ppm, C3: 10 ppm

Figura 3.

Distribución de los tratamientos en la investigación.



2.3. Proceso metodológico

2.3.1. Identificación taxonómica de las especies herbáceas.

Las especies fueron identificadas en el Herbario Kuélap de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza. De acuerdo a la constancia de determinación (Anexo 1), el cadillo es identificado con el nombre científico de *Bidens pilosa* L. y la hierba mora como *Solanum* sp.

2.3.2. Preparación de los dos sustratos

Para la preparación del primer sustrato se utilizó arena, turba y tierra agrícola en una relación de 1:1:1 y para el segundo sustrato se utilizó los mismos componentes con una relación 1/2:1:1, respectivamente.

Para medir el potencial de hidrógeno (pH) y la conductividad eléctrica (CE) se empleó el método de relación suelo 1:1 (v:v) (López Aguilar et al., 2002). El contenido de fósforo (P) disponible en el suelo se determinó por el método de Olsen modificado (Sánchez, 2016). El potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg), sodio (Na), aluminio (Al) y capacidad de intercambio catiónico (CIC) fueron determinados por el método Saturación con Acetato de Amonio 1N pH 7.0 (Sánchez, 2016). El porcentaje de carbono (C) y materia orgánica (MO) fueron determinados por el método de Walkley y Black (1934). Todos los análisis se realizaron en Laboratorio de Investigación en Aguas y Suelos de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza (Tabla 1).

Tabla 2.

Caracterización de los dos sustratos utilizados para la investigación.

Parámetros	S1 (1 arena: 1 turba: 1 tierra agrícola)	S2 (1/2 arena: 1 turba: 1 tierra agrícola)
pH	6,27	5,53
CE	0.23	0,31
P (ppm)	5.81	5,14
K (ppm)	103.82	173,32
C	3.25	3,75
M.O	5.60	6,47
N	0.28	0,32
CIC	15.20	14,40

2.3.3. Instalación del experimento

Para realizar esta actividad se empleó macetas de tres kilos, donde se inició con el riego utilizando ClCd_2 en una relación de 1:1. Luego, se realizó la aplicación de 5 y 10 ppm de Cd por maceta, de acuerdo a los tratamientos. Se dejó en reposo por 15 días, removiendo constantemente el suelo, para luego realizar la siembra de las dos especies.

Las evaluaciones se realizaron cada 8 días durante dos meses, donde se evaluaron las siguientes variables:

- **Altura, diámetro de tallo y área foliar**

Estas variables morfométricas se midieron con un vernier digital y el diámetro del tallo se midió 5 cm por encima de la superficie del suelo.

- **Longitud de raíz, número de raíces, peso foliar (fresco y seco) y peso de raíz fresco y seco).**

Para evaluar estas variables se utilizaron el vernier digital y una balanza analítica.

- **Contenido relativo de agua, clorofila SPAD**

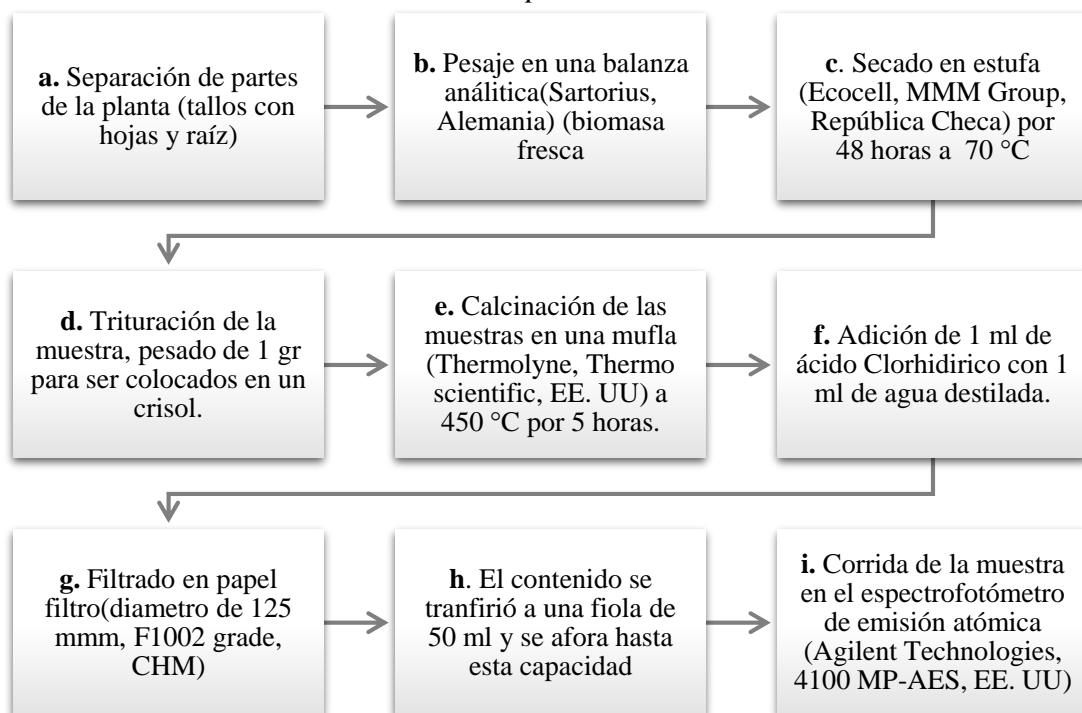
El índice de clorofila y conductancia estomática se evaluó entre las 9-10:00 a.m. Se empleó un Porómetro foliar SC – 1 (Decagon Devices, Pullman WA, EE. UU) y clorofilómetro SPAD-502 (Minolta Spectrum Technologies Inc., Plainfield IL, EE. UU). Los datos se registraron en tres hojas apicales completamente expandidas.

2.3.4. Determinación de Cd en partes vegetales de las especies herbáceas

Para el análisis de Cd de las muestras de las partes vegetales se empleó el método de Vía Seca (Cardenas, 2012). Se procedió de acuerdo a la figura 4

Figura 4.

Procedimiento de análisis de cadmio plantas.



2.3.5. Análisis de cadmio en suelo

Para determinar el contenido de Cd en el suelo, se realizó de acuerdo a la metodología EPA 3050B (Barrueta Rivera, 2013), utilizando el espectrofotómetro de absorción atómica (Agilent Technologies, 4100 MP-AES, EE. UU)

2.4. Análisis de investigadores respecto al tema

Se Realizo una entrevista escrita a 5 investigadores de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza, donde se plasmaban preguntas sobre el efecto que trae consigo la acumulación de Cd en los recursos naturales, sobre estrategias de mitigación y sobre la importancia del uso de especies herbáceas en la fitorremediación (Anexo 3).

2.5. Análisis de datos

El factor de translocación (1) y de bioconcentración (2) de cadmio se determinó a través de la siguiente fórmula de acuerdo a Feng et al. (2020)

$$FT = \frac{[Cd]_{\text{en parte aérea}}}{[Cd]_{\text{raíz}}} \text{ ----- (1)}$$

$$FBC = \text{concentración de cadmio en brote o raíz / suelo ----- (2)}$$

Los datos se analizaron con el software estadístico InfoStat versión 2018 (Di Rienzo et al., 2008). Se identificaron las medias y la desviación estándar de todos los datos (variables morfológicas, fisiológicas, concentraciones de Cd en partes vegetales del cacao y factores de transferencia). Se realizó primero el test de Kolmogorov Smirnov para contrastar la normalidad, luego se realizó el análisis ANOVA, se procedió a realizar la prueba Tukey para ver la diferencia entre factores. Además, se realizó una correlacionaron Pearson's, mediante un gráfico de corrplot para ver la significancia y la correlación entre las variables estudiadas.

Modelo aditivo lineal

$$Y_{ijk} = \mu + A_i + B_j + C_k + AB_{ik} + BC_{jk} + CA_{ij} + ABC_{ijk} + E_{ijk}$$

Donde: $i=1,2,\dots, a$; $j=1,2,\dots,b$; $k=1,2,\dots,c$; $l=1,2,\dots,r$

Donde:

Y= La variable respuesta

μ = Media general de la respuesta.

A= Efecto de las especies herbáceas.

B= Efecto del tipo de sustrato.

C= Efecto de las concentraciones de cadmio en el suelo.

AxBxC= Efecto de la interacción de las especies herbáceas por el tipo de sustrato por la concentración de cadmio en el suelo.

E= Error experimental

III. RESULTADOS

3.1. Determinación de parámetros morfológicos y fisiológicos de las especies herbáceas (hierba mora, cadillo) fitorremediadoras

3.1.1. Características morfológicas

En la variable altura, de acuerdo a la tabla 3, se observa que el cadillo, con el sustrato S2 (1/2 arena: 1 tierra agrícola: 1 turba) y con una concentración de 10 ppm CdCl₂, reportó el mayor promedio con 27.18; mientras que la hierba mora con el mismo sustrato sin la aplicación de CdCl₂; respecto al área foliar, no se evidenció diferencia estadística significativa; en número de brotes (19.00±1.87), en peso fresco (26.70±6.45) y peso seco foliar (5.77±0.99), el sustrato S2, con el cadillo y con 10 ppm de CdCl₂ tuvo mayor promedio en las tres variables; en relación al promedio menor, en número de brotes la hierba mora, con el sustrato S2 y 0 ppm CdCl₂, tuvo 5.40; en peso fresco foliar la hierba mora, con el sustrato S1 y 10 ppm CdCl₂ con un promedio de 10.90 g y peso seco foliar fueron los tratamientos con hierba mora, el sustrato S1, 0 y 10 ppm CdCl₂ con un promedio de 2.27 g para ambos tratamientos.

Tabla 3.

Análisis de varianza para variables morfológicas (parte foliar).

Factores	Altura (cm)	N° de brotes	Peso fresco foliar (Tallos y Hojas) g/Planta	Peso seco foliar (Tallos y Hojas) g/Planta
Especies				
Cadillo	23.90±4.22 a	14.77±4.44 b	19.07±6.97 a	4.05±1.48 a
Hierba mora	18.93±2.10 b	6.87±1.83 a	14.67±3.74 b	2.84±0.88 b
Tipo de sustrato				
1 arena: 1 tierra agrícola: 1 turba	19.85±2.94 b	10.50±4.42 ns	15.19±4.74 b	2.92±0.95 b
1/2 arena: 1 tierra agrícola: 1 turba	22.87±4.68 a	11.13±5.96 ns	18.55±6.65 a	3.97±1.50 a
Concentraciones de Cadmio				
0 ppm	20.32±4.73 b	10.50±5.74 ns	15.50±5.02 ns	3.13±1.09 ns
5 ppm	21.46±3.78 ab	11.3±4.24 ns	17.38±5.46 ns	3.63±1.42 ns
10 ppm	22.46±3.79 a	10.65±5.75 ns	17.73±7.27 ns	3.58±1.52 ns

E*TS*C				
E1*S1*C1	18.68±1.75 c	17.20±5.50 ab	18.30±3.17 abc	4.01±0.85 abc
E1*S1*C2	20.30±1.81 bc	11.80±3.03 bc	16.80±6.27 bc	3.15±1.18 c
E1*S1*C3	23.98±2.82 ab	11.00±2.00 cd	18.70±4.51 abc	3.46±0.59 c
E1*S2*C1	26.62±2.90 a	12.40±3.21 bc	11.80±7.16 c	2.60±1.17 c
E1*S2*C2	26.64±2.70 a	17.20±0.84 ab	22.10±5.66 ab	5.33±1.08 ab
E1*S2*C3	27.18±4.11 a	19.00±1.87 a	26.70±6.45 a	5.77±0.99 a
E2*S1*C1	16.84±1.68 c	7.00±1.87 cd	13.30±3.60 bc	2.27±0.44 c
E2*S1*C2	20.22±3.13 bc	9.00±1.58 cd	13.12±3.27 bc	2.35±0.58 c
E2*S1*C3	19.70±1.10 bc	7.00±0.71 cd	10.90±2.41 c	2.27±0.45 c
E2*S2*C1	18.58±1.52 c	5.40±2.07 d	18.60±0.55 abc	3.63±0.89 bc
E2*S2*C2	18.68±0.83 c	7.20±1.30 cd	17.50±2.89 abc	3.69±0.86 bc
E2*S2*C3	19.54±2.46 bc	5.60±1.14 d	14.60±3.29 bc	2.81±0.78 c

Las letras a, b, c son significativamente diferentes ($p > 0.05$; ns: sin diferencia significativa)

En las variables evaluadas en raíz de acuerdo a la tabla 4, se observa que mayor peso fresco y seco lo tuvo la hierba mora, el sustrato S2 y 10 ppm de CdCl_2 con 20 g y 2.57 g respectivamente y la hierba mora, S2 y 0 ppm CdCl_2 , registro el menor peso en fresco y seco con 1.52 g y 0.47 g.

En longitud de raíz, la hierba mora, S2 y 5 ppm CdCl_2 , tuvo mayor longitud con 35.80 cm y la hierba mora, S2 y 0 ppm CdCl_2 registro la menor longitud con 18.04 cm; en número de raíces. La hierba morar, con el sustrato S2 sin CdCl_2 , reporto el mayor promedio con 23.80 y la misma especie, con el mismo tipo de sustrato y 5 ppm de CdCl_2 , tuvo el menor promedio con 11.20.

Tabla 4.*Análisis de varianza para variables morfológicas (parte radicular).*

Factores	Peso fresco radicular (Raíz) g/Planta	Peso seco radicular (Raíz) g/Planta	Longitud de raíz	Número de raíz
Especies				
Cadillo	7.18±4.76 b	0.74±0.32 b	25.42±7.94 b	13.22±2.61 b
Hierba mora	16.13±4.80 a	2.08±0.59 a	27.77±5.19 a	18.83±4.21 a
Tipo de sustrato				
1 arena: 1 tierra agrícola: 1 turba	12.01±6.91 ns	1.32±0.82 ns	26.12±7.20 ns	15.17±2.93 b
1/2 arena: 1 tierra agrícola: 1 turba	11.30±6.26 ns	1.50±0.83 ns	27.07±6.36 ns	16.88±5.55 a
Concentraciones de Cadmio				
0 ppm	8.95±7.83 b	1.27±0.93 b	25.22±6.94 b	16.48±5.70 ab
5 ppm	12.13±5.94 a	1.39±0.74 ab	28.60±8.12 a	14.55±3.44 b
10 ppm	13.90±4.82 a	1.58±0.79 a	25.96±4.56 b	17.05±3.80 a
E*TS*C				
E1*S1*C1	3.28±0.93 ef	0.59±0.17 e	25.94±8.62 ab	12.80±1.79 cd
E1*S1*C2	5.40±2.01 def	0.50±0.15 e	19.22±3.32 b	13.00±1.58 cd
E1*S1*C3	12.30±3.65 c	0.85±0.19 de	26.60±7.44 ab	14.80±3.03 bcd
E1*S2*C1	1.52±0.91 f	0.47±0.34 e	18.04±3.67 b	11.50±2.35 c
E1*S2*C2	10.70±3.85 cd	1.01±0.28 cde	35.80±6.35 a	11.20±1.92 c
E1*S2*C3	9.90±3.19 cde	1.04±0.17 cde	26.90±2.63 ab	16.00±1.87 bcd
E2*S1*C1	11.60±1.92 cd	1.50±0.22 bcd	29.40±5.68 ab	17.80±1.48 abc
E2*S1*C2	19.50±3.86 ab	1.91±0.37 ab	31.54±8.06 a	16.20±1.79 bcd
E2*S1*C3	20.00±3.00 a	2.57±0.57 a	24.00±4.77 ab	16.40±4.10 bcd
E2*S2*C1	19.40±5.61 ab	2.50±0.76 a	27.50±3.91 ab	23.80±5.12 a
E2*S2*C2	12.90±2.43 bc	2.14±0.38 ab	27.84±3.31 ab	17.80±3.63 abc
E2*S2*C3	13.40±2.77 abc	1.84±0.45 abc	26.32±2.70 ab	21.00±3.39 ab

Las letras a, b, c son significativamente diferentes ($p > 0.05$; ns: sin diferencia significativa)

3.1.2. Variables fisiológicas

Respecto a las dos variables evaluadas, se observa que en la tabla 5, que en conductancia estomática e índice de clorofila (SPAD), fue mayor en la hierba mora, sembrado en el sustrato S2, sin CdCl₂, con 488.02 y 62.79 respectivamente.

La conductancia estomática fue menor en el cadillo, sustrato S2 y 5 ppm de CdCl₂, con 94.60 y en el índice de clorofila en el cadillo, sustrato S1 y 10 ppm CdCl₂ con 47.08.

Tabla 5.

Análisis de varianza para las variables fisiológicas.

	Índice de clorofila SPAD	Conductancia estomática
Especies		
Cadillo	49.87±4.45 a	277.83±129.42 b
Hierba mora	56.40±7.18 a	345.08±154.95 a
Tipo de sustrato		
1 arena: 1 tierra agrícola: 1 turba	52.54±6.42 ns	348.27±113.11 a
1/2 arena: 1 tierra agrícola: 1 turba	53.73±7.17 ns	274.64±165.83 b
Concentraciones de Cadmio		
0 ppm	56.84±6.41 a	364.72±121.63 a
5 ppm	50.31±4.97 b	269.59±175.09 b
10 ppm	52.26±7.28 b	300.06±123.93 ab
E*TS*C		
E1*S1*C1	49.05±1.66 bc	326.18±67.58 abc
E1*S1*C2	47.60±4.05 bc	395.84±125.86 ab
E1*S1*C3	47.08±5.82 c	272.22±104.05
E1*S2*C1	55.03±3.41 abc	291.90±89.06 abc
E1*S2*C2	52.29±3.54 abc	94.60±37.75 c
E1*S2*C3	48.21±2.24 bc	286.24±134.78 abc
E2*S1*C1	60.48±1.61 a	352.78±102.34 ab
E2*S1*C2	53.12±5.45 abc	418.88±136.38 ab
E2*S1*C3	57.92±3.83 ab	323.72±121.50 abc
E2*S2*C1	62.79±6.11 a	488.02±140.12 a
E2*S2*C2	48.25±5.44 bc	169.02±105.12 bc
E2*S2*C3	55.83±9.39 abc	318.06±163.97 abc

Las letras a, b, c son significativamente diferentes ($p > 0.05$; ns: sin diferencia significativa)

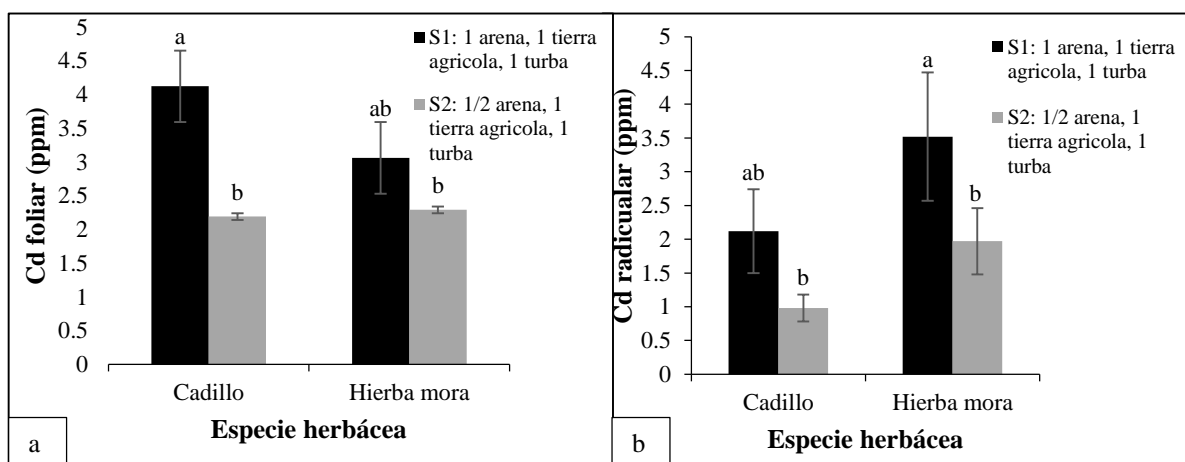
3.2. Factores de translocación y de bioacumulación de las especies herbáceas

En la Figura 5, se observa que en el sustrato S1 con pH 6.27, ambas especies herbáceas tuvieron altas concentraciones de Cd en la parte foliar, resaltando el cadillo con un promedio de 4.12 y seguido la hierba mora con 3.06 ± 1.19 .

Respecto a la concentración de Cd en raíz, la hierba mora y el cadillo tuvieron altas concentraciones en sustrato S1 con 2.12 ± 0.62 y 3.52 ± 0.95 , respectivamente.

Figura 5.

Concentración de Cd en la parte foliar y radicular.



a) Concentración de Cd en la parte foliar, b) Concentración de Cd en la parte radicular.

En la tabla 6 se puede observar, que en los tratamientos que fueron agregados cadmio, la concentración final de Cd en estos suelos fue casi 0; teniendo así que el sustrato S1, con el cadillo y con una concentración inicial de 10 ppm; registró la más alta concentración de Cd en el suelo con 0.67 ppm; una concentración final en el sustrato S1 0.27 ppm y sustrato S2 con 0.19 ppm.

Tabla 6.*Análisis de varianza para la concentración final de Cd en los dos sustratos.*

Factores	Concentración final de Cd en el suelo
Especies	
Cadillo	0.20±0.01 ns
Hierba mora	0.26±0.1 ns
Tipo de sustrato	
1 arena: 1 tierra agrícola: 1 turba	0.27±0.12 a
1/2 arena: 1 tierra agrícola: 1 turba	0.19±0.10 b
Concentraciones de Cadmio	
0 ppm	0.00±0.00 a
5 ppm	0.23±0.10 b
10 ppm	0.46±0.13 c
E*TS*C	
E1*S1*C1	0.00±0.00 c
E1*S1*C2	0.19±0.1 c
E1*S1*C3	0.63±0.12 ab
E1*S2*C1	0.00±0.00 c
E1*S2*C2	0.23±0.11 bc
E1*S2*C3	0.14±0.10 c
E2*S1*C1	0.00±0.00 c
E2*S1*C2	0.13±0.05 c
E2*S1*C3	0.67±0.21 a
E2*S2*C1	0.00±0.00 c
E2*S2*C2	0.38±0.12 abc
E2*S2*C3	0.39±0.11 abc

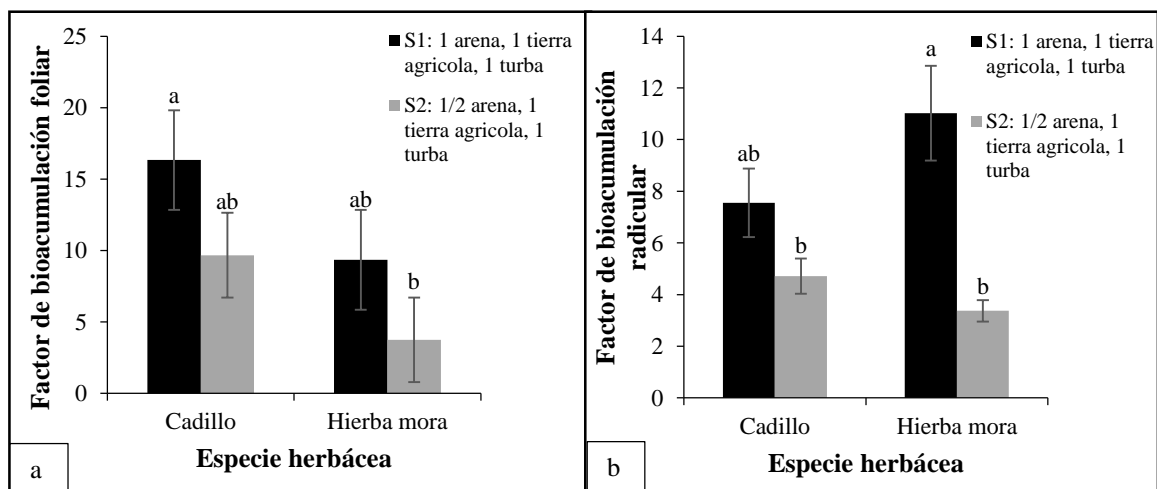
Las letras a, b, c son significativamente diferentes ($p > 0.05$; ns: sin diferencia significativa)

En el factor de bioacumulación en las diferentes partes de la planta, se puede observar que cadillo en la parte foliar, tuvo en los dos tipos de sustrato siendo así en sustrato S1 con 16.34 ± 5.61 y en el sustrato S2 con 9.68 ± 1.75 (Figura 6a); así mismo, se puede resaltar que ambas especies herbáceas presentaron mejores resultados en el sustrato S1.

En la parte radicular, se observa que ambas especies presentaron mejores resultados en el sustrato S1, resaltando así que la hierba mora con 11.02 ± 1.83 y seguido se encuentra el cadillo con 7.55 ± 3.37 (Figura 6b).

Figura 6.

Factor de bioacumulación de las dos especies herbáceas en diferentes sustratos.

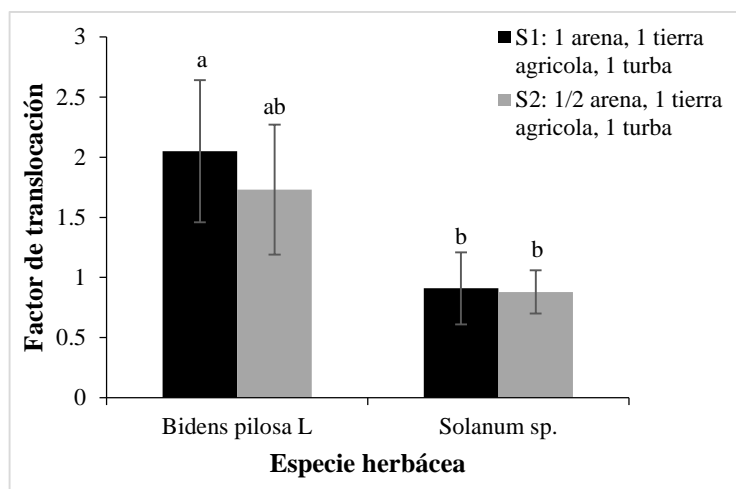


a) Factor de bioacumulación en la parte foliar, b) Factor de bioacumulación en la parte radicular

De acuerdo a la Figura 11, en el factor de translocación, el cadillo en ambos sustratos presento mejores resultados, teniendo así que en el sustrato S1, tuvo mejor promedio de factor de translocación con 2.05 ± 0.59 y en sustrato S2 con 1.73 ± 0.54 ; mientras que la hierba mora tuvo valores menores de uno.

Figura 7.

Factor de translocación en las dos especies herbáceas.

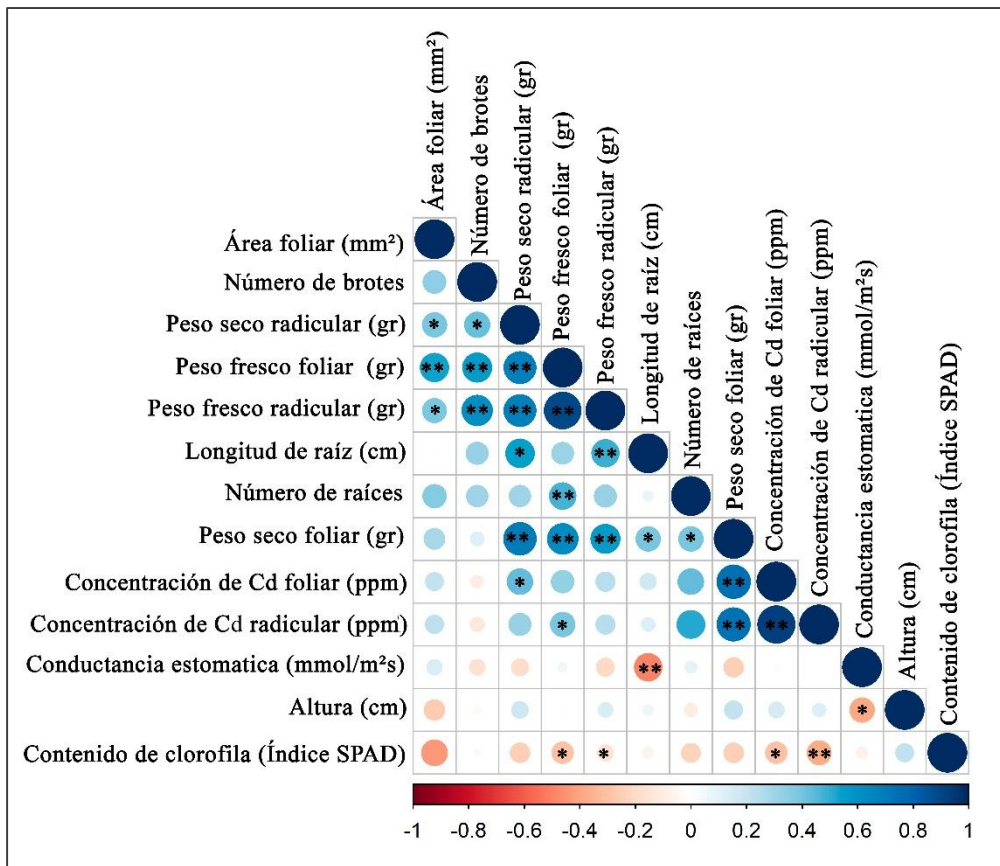


3.3. Nivel de fitorremediación con las especies herbáceas

La concentración de Cd foliar tuvo una correlación positiva significativa muy alta con la concentración de Cd radicular ($r=0.9^{**}$) en la especie herbácea cadillo (Figura 8), lo que indica que a mayor concentración de Cd foliar (ppm), mayor es la concentración radicular. Mientras que, la conductancia estomática con la longitud de raíz tuvo una correlación alta negativa significativa ($r=-0.5^{**}$), donde a mayor conductancia estomática menor va ser la longitud de raíz o viceversa.

Figura 8.

Correlación entre los parámetros morfo-fisiológicos y concentraciones de Cd evaluados en el cadillo.

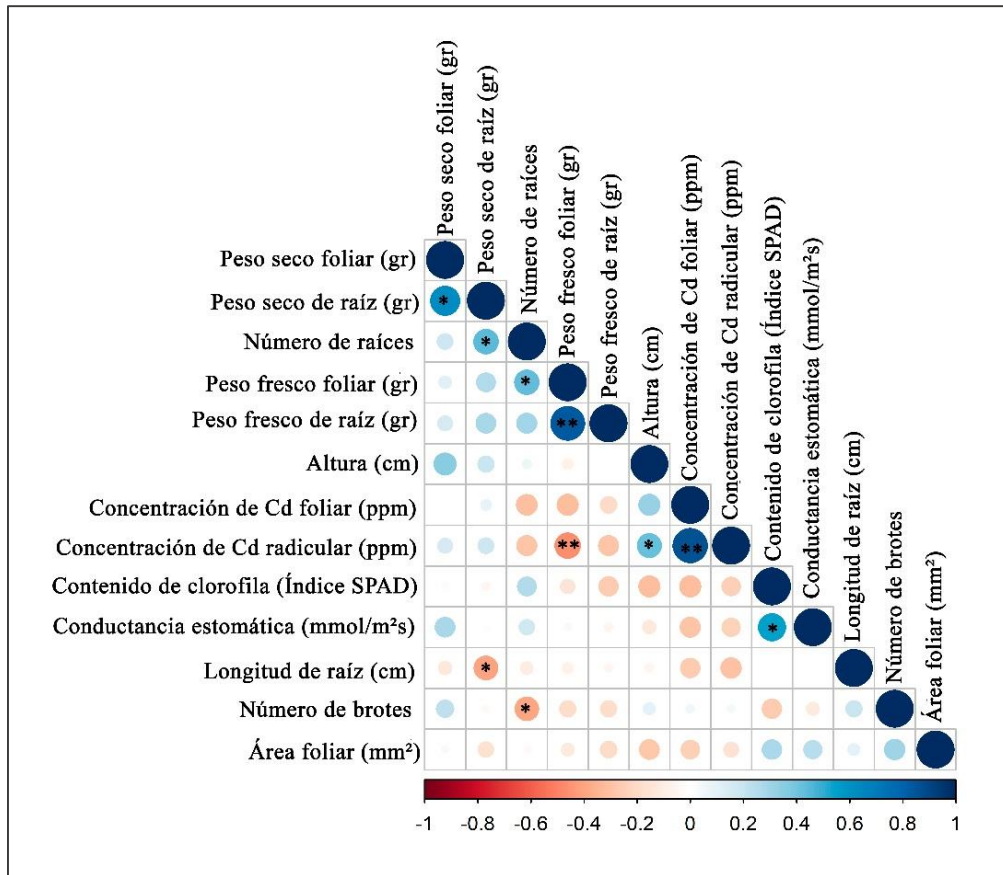


* Valores de correlación significativos ($p \leq 0.05$). ** Valores de correlación altamente significativos ($p \leq 0.01$)

En la hierba mora, se observa que la concentración de Cd foliar tiene una correlación positiva significativa alta con la concentración de Cd radicular ($r=0.9^{**}$) mostrando que tienen una relación directamente proporcional (Figura 9). Además, se muestra una correlación negativa significativa alta del peso fresco foliar con la concentración de Cd en raíz ($r=0.5^{**}$), indicando que a mayor peso que presente la especie herbácea va ser menos la concentración de Cd que se va encontrar en la raíz.

Figura 9.

Correlación entre los parámetros morfo-fisiológicos y concentraciones de Cd evaluados en la hierba mora.



* Valores de correlación significativos ($p \leq 0.05$). ** Valores de correlación altamente significativos ($p \leq 0.01$)

3.4. Consecuencias de la concentración de Cd en el cultivo de cacao y sobre fitorremediación

3.4.1. Percepción sobre la contaminación de cadmio en el cacao

Respecto a la percepción de la contaminación de cadmio en el principal cultivo en la región el cacao, los investigadores entrevistados lo dividen en tres aspectos ambiental, económico y social, de acuerdo a la figura 10.

Figura 10.

Efectos que produce el Cd en el aspecto ambiental, económico y social.

AMBIENTAL	ECONÓMICO	SOCIAL
<ul style="list-style-type: none">• En los suelos origina que sean poco aptos para la instalación de cultivos• Efectos dañinos en las plantas, inhibe el desarrollo de las morfológico y fisiológico	<ul style="list-style-type: none">• Afecta al agricultor, pues debido a las concentraciones de Cd por encima de los niveles permitidos, sus productos no podrán ser comercializados afectando significativamente sus ingresos• Para el país la disminución de divisas extranjeras al exportar en menos cantidades.	<ul style="list-style-type: none">• El efecto negativo sobre la percepción del cacao, debido al rechazo del producto de los mercados internacionales, podría hacer que los productores opten por un cambio de cultivo, abandonando sus parcelas.

3.4.2. Estrategias para minimizar la concentración de cadmio

Respecto a las estrategias es importante primero empezar con el cultivo, como es emplear material genético con baja afinidad por la absorción de Cd; también desarrollar un plan de cultivo (manejo agronómico); en el suelo se puede implementar estrategias para inmovilizar y disminuir la disponibilidad de cadmio en el suelo e implementación de tecnología de fitoextracción de metales pesados.

3.4.3. Fitorremediación sobre el uso de especies herbáceas

La fitorremediación mediante el uso de especies herbáceas puede ser una medida sostenible para reducir el impacto ambiental en suelos degradados por sistemas como el de mineras que afectan suelos; ya que son de fácil crecimiento y tienen gran biomasa para la acumulación de metales pesados.

IV. DISCUSIÓN

La fitorremediación es un método eficaz y respetuoso con el medio ambiente para reducir los iones contaminantes presentes en los recursos naturales (El-Mahrouk et al., 2019); el empleo de plantas hiperacumuladoras de metales pesados es una alternativa para la fitorremediación, la respuesta que tienen estas plantas difieren en su aspecto morfológico, los procesos fisiológicos que contribuyen a su capacidad para acumular y desintoxicar Cd (He et al., 2017) . Es por ello que se utilizó dos especies herbáceas; se tuvo que respecto a la altura de planta entre las dos especies herbáceas y las concentraciones de Cd, como se puede observar que a mayor concentración (10 ppm) de Cd la planta tuvo mejor altura; en algunas plantas, el estrés por Cd promueve su crecimiento (Zhang et al., 2020), como es en el cadillo que la aplicación de Cd facilita el mayor crecimiento (Sun et al., 2009). Del mismo modo, con la *Solanum* sp. (Shi et al., 2016) que, sin embargo, en algunas Solanáceas la concentración elevada de metales pesados, inhiben el crecimiento como es en la *S. nigrum* (Gao et al., 2010).

En el área foliar no se evidenció una diferencia estadística significativa, de acuerdo a Fattahi et al. (2019) Cd es así que la presencia de Cd es un aspecto negativo para el incremento del área foliar en la planta (Fattahi et al., 2019); mientras que en el número de brotes en algunas plantas la aplicación de Cd favorece el aumento de esta variable (Muszyńska et al., 2018).

Respecto al peso (seco y fresco) foliar y radicular , se observó que tuvieron valores altos en suelos que contenían mayor concentración de Cd; en algunas plantas, la aplicación de Cd no influye sobre el peso de la raíz y foliar (Hatamian et al., 2017), mientras que en otras especies herbáceas, se reducen estas variables en niveles alto de Cd (Ying et al., 2010). Respecto a la longitud de la raíz, se observó donde hubo concentraciones de Cd se tuvo mayor longitud; de acuerdo a Guoju et al. (2016), las raíces más largas podrían contribuir a una mayor capacidad para transferir Cd de las raíces hacia brotes en las especies herbáceas, sin embargo, en algunos cultivos, el Cd inhibe el crecimiento de las raíces reduciendo el desarrollo óptimo de la planta (R. Ali et al., 2012)

El Cd produce cambios en la fotosíntesis, en la conductancia estomática y otros parámetros fisiológicos (El Rasafi et al., 2020). Los parámetros fisiológicos

evaluados como la conductancia estomática y el contenido de clorofila (Índice SPAD), observamos que a mayor estrés con Cd, estos parámetros tiende a disminuir; en algunos cultivos tiende a pasar lo mismo, donde suelos que contenían Cd, disminuyó significativamente los valores de clorofila (X. Song et al., 2019), lo que es un indicador que es altamente toxico para las plantas y/o microorganismos (Adamczyk-Szabela et al., 2019).

Los dos sustratos utilizados, tienen pH diferentes, donde la variación del pH desempeña un papel importante en la absorción y acumulación de Cd en las plantas (Rahman et al., 2021), teniendo así que, en el sustrato S1 que tenía un pH mayor (6.27) las especies tuvieron mayor concentración de Cd en toda sus partes vegetales en comparación con el sustrato S2 (5.53); González et al. (2010) indica que pH bajos hay menos absorción Cd por parte de las plantas y pasa al contrario con pH altos.

B. pilosa es una especie hiperacumuladora de Cd distribuida en el mundo con gran biomasa y rápido crecimiento (Dai et al., 2021), en los resultados obtenidos referente al factor de bioacumulación y de translocación superaron el valor de 1, mostrando así que en su diversos tejidos tiene una acumulación masiva de Cd (Khalid et al., 2019).

Solanum sp. se considera una planta apta para restaurar suelos con presencia de Cd (Liu et al., 2013) y tiene un potencial de acumulación de Cd (H. Ali et al., 2013), los valores del factor de bioacumulación (BF) superaron a 1, mientras que el factor de translocación (TF) los valores estuvieron cerca de 1.

La aplicación de algunos fertilizantes fosfatados podría aumentar la solubilidad del Cd al reducir el pH del suelo, lo que conlleva mayor acumulación de Cd en los suelos (Sarwar et al., 2010). El pH del suelo contribuye en la disponibilidad de Cd en las plantas (Haider et al., 2021), teniendo así que, las especies herbáceas sembradas en el sustrato S1 con pH 6.27 tuvieron mayor concentración de Cd en comparación con S2 con pH 5.53. Esto indica que con una mayor acidez aumenta la movilidad y solubilidad de este metal; por ende, el riesgo de asimilación por las plantas (Wang et al., 2006).

En ambas especies herbáceas se tuvo una correlación positiva muy alta entre la concentración de Cd en raíz y en foliar; lo cual indica que el aumento de las

concentraciones de Cd en la rizosfera aumenta el almacenamiento de Cd en la planta (Lux et al., 2011); en algunos parámetros morfológicos y las dos variables fisiológicas evaluadas, lo que indica Almuwayhi (2021), que para algunas plantas, la toxicidad del Cd afecta negativamente las características morfológicas de raíces, tallos, hojas, semillas, flores y frutos y también sus características fisiológicas.

Para minimizar el impacto que el Cd tiene sobre el cultivo de cacao, los investigadores plantean diversas estrategias; el mejoramiento de cultivares con bajo contenido de Cd probablemente proporcione el mayor potencial de mitigación, pero la investigación genética y de mejoramiento; actualmente está limitada por la falta de estudios que expliquen cómo se transfiere el Cd en el fruto de cacao en el desarrollo de este árbol (Vanderschueren et al., 2021). La alternativa para la mitigación de Cd debe ser enfocada en la fisiología de las plantas (p. ej., reproducción, portainjertos) la cual tienen una mayor probabilidad de éxito que las estrategias basadas en el suelo (p. ej., remediación) (Wade et al., 2022). Sin embargo, la combinación de ambos métodos (fisiológico de la planta y remediación) puede resultar óptimo; ya que la fitorremediación basada en plantas es considerada segura, respetuosa con el ambiente y rentable para la remediación de metales tóxicos (Raza et al., 2020).

V. CONCLUSIONES

Respecto a las características morfológicas en su mayoría presentaron mejores resultados en suelos que contenían cadmio y con el sustrato de pH de 5.53.

Las dos variables fisiológicas evaluadas presentaron altos valores en los tratamientos donde no se agregó Cd, indicando que a mayores concentraciones de cadmio la planta sufre un estrés fisiológico.

El sustrato con pH 6.27, las dos especies herbáceas tuvieron mayor acumulación de Cd en la parte radicular y foliar, además de ello en los factores de translocación y bioacumulación superaron el valor de 1, indicando que estas especies son denominadas hiperacumuladoras.

Una de las principales estrategias para mitigar el problema de Cd en los cultivos de cacao, es utilizar material genético con baja afinidad por la absorción de cadmio y utilizar especies herbáceas para la fitorremediación de suelos contaminados por Cd.

Las dos especies herbáceas utilizadas en la investigación, se puede considerar como especies hiperacumuladoras de Cd, ya que han demostrado tener la capacidad de acumular este metal diferentes partes de sus tejidos, teniendo así las concentraciones finales de Cd en los sustratos utilizados; en el sustrato S1 0.27 ppm y sustrato S2 con 0.19 ppm.

VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adamczyk-Szabela, D., Lisowska, K., Romanowska-Duda, Z., & Wolf, W. M. (2019). Associated Effects of Cadmium and Copper Alter the Heavy Metals Uptake by *Melissa Officinalis*. *Molecules* 2019, Vol. 24, Page 2458, 24(13), 2458. <https://doi.org/10.3390/MOLECULES24132458>
- Adrees, M., Ali, S., Rizwan, M., Zia-ur-Rehman, M., Ibrahim, M., Abbas, F., Farid, M., Qayyum, M. F., & Irshad, M. K. (2015). Mechanisms of silicon-mediated alleviation of heavy metal toxicity in plants: A review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 119, 186–197. <https://doi.org/10.1016/J.ECOENV.2015.05.011>
- Ali, H., Khan, E., & Sajad, M. A. (2013). Phytoremediation of heavy metals—Concepts and applications. *Chemosphere*, 91(7), 869–881. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2013.01.075>
- Ali, R., Sheirdil, K., Bashir, R., & Hayat. (2012). Effect of cadmium on soybean (*Glycine max* L) growth and nitrogen fixation. *African Journal of Biotechnology*, 11(8), 1886–1892. <https://doi.org/10.5897>
- Almuwayhi, M. A. R. (2021). Effect of cadmium on the molecular and morpho-physiological traits of *Pisum sativum* L. <http://mc.manuscriptcentral.com/tbeq>, 35(1), 1374–1384. <https://doi.org/10.1080/13102818.2021.1978318>
- Barrueta Rivera, S. V. (2013). *Guía metodológica para el muestreo y detección de cadmio en suelos, agua, fertilizantes, almendras de cacao y productos derivados* (p. 77). Comisión Nacional para el Desarrollo y Vida Sin Drogas.
- Cardenas, A. A. (2012). Presencia del Cadmio en algunas parcelas de cacao orgánico en la cooperativa Agraria Industrial Naranjillo - Tingo María - Perú. En *Universidad Nacional Agraria de la Selva*.
- Dai, H., Wei, S., Pogrzeba, M., Krzyżak, J., Rusinowski, S., & Zhang, Q. (2021). The cadmium accumulation differences of two *Bidens pilosa* L. ecotypes from clean farmlands and the changes of some physiology and biochemistry indices. *Ecotoxicology and environmental safety*, 209. <https://doi.org/10.1016/J.ECOENV.2020.111847>
- Di Rienzo, J., Balzarini, M., Robledo, C., Casanoves, F., Gonzales, L., & Tablada, E.

- (2008). InfoStat Software manual del usuario. *FCA Universidad Nacional de Córdoba, November 2015*, 334.
- El-Mahrouk, E. S. M., Eisa, E. A. H., Hegazi, M. A., Abdel-Gayed, M. E. S., Dewir, Y. H., El-Mahrouk, M. E., & Naidoo, Y. (2019). Phytoremediation of Cadmium-, Copper-, and Lead-contaminated Soil by *Salix mucronata* (Synonym *Salix safsaf*). *HortScience*, *54*(7), 1249–1257. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI14018-19>
- El Rasafi, T., Oukarroum, A., Haddioui, A., Song, H., Kwon, E. E., Bolan, N., Tack, F. M. G., Sebastian, A., Prasad, M. N. V., & Rinklebe, J. (2020). Cadmium stress in plants: A critical review of the effects, mechanisms, and tolerance strategies. <https://doi.org/10.1080/10643389.2020.1835435>, *52*(5), 675–726. <https://doi.org/10.1080/10643389.2020.1835435>
- Fattahi, B., Arzani, K., Sour, M. K., & Barzegar, M. (2019). Effects of cadmium and lead on seed germination, morphological traits, and essential oil composition of sweet basil (*Ocimum basilicum* L.). *Industrial Crops and Products*, *138*, 111584. <https://doi.org/10.1016/J.INDCROP.2019.111584>
- Feng, D., Huang, C., Xu, W., Qin, Y., Li, Y., Li, T., Yang, M., & He, Z. (2020). Difference of Cadmium Bioaccumulation and Transportation in Two Ryegrass Varieties and the Correlation between Plant Cadmium Concentration and Soil Cadmium Chemical Forms. *Wireless Personal Communications*. <https://doi.org/10.1007/s11277-019-06727-x>
- Gao, Y., Zhou, P., Mao, L., Shi, W. J., & Zhi, Y. E. (2010). Phytoextraction of cadmium and physiological changes in *Solanum nigrum* as a novel cadmium hyperaccumulator. *Russian Journal of Plant Physiology* *2010* *57*:4, *57*(4), 501–508. <https://doi.org/10.1134/S1021443710040072>
- Genchi, G., Sinicropi, M. S., Lauria, G., Carocci, A., & Catalano, A. (2020). The Effects of Cadmium Toxicity. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *17*(11). <https://doi.org/10.3390/IJERPH17113782>
- González, C., Thompson, J., Martínez, Y., & Sánchez, N. (2010). Concentración de cadmio en partículas de diferentes tamaños de un suelo de la Cuenca del Lago de Valencia. *Revista de la Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela*, *25*(2), 73–80. http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0798-

- Guo, D., Ali, A., Ren, C., Du, J., Li, R., Lahori, A. H., Xiao, R., Zhang, Z., & Zhang, Z. (2019). EDTA and organic acids assisted phytoextraction of Cd and Zn from a smelter contaminated soil by potherb mustard (*Brassica juncea*, Coss) and evaluation of its bioindicators. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *167*, 396–403. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.10.038>
- Guoju, X., Fengju, Z., Juying, H., Chengke, L., Jing, W., Fei, M., Yubi, Y., Runyuan, W., & Zhengji, Q. (2016). Response of bean cultures' water use efficiency against climate warming in semiarid regions of China. *Agricultural Water Management*, *173*, 84–90. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2016.05.010>
- Haider, F. U., Liqun, C., Coulter, J. A., Cheema, S. A., Wu, J., Zhang, R., Wenjun, M., & Farooq, M. (2021). Cadmium toxicity in plants: Impacts and remediation strategies. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *211*, 111887. <https://doi.org/10.1016/J.ECOENV.2020.111887>
- Han, B. (2019). Study on Soil Remediation Technology of Cadmium Contaminated Site. *Open Journal of Applied Sciences*, *9*(3), 115–120. <https://doi.org/10.4236/OJAPPS.2019.93010>
- Hatamian, M., Nejad, A. R., Kafi, M., Souri, M. K., & Shahbazi, K. (2017). Nitrate improves hackberry seedling growth under cadmium application. *Heliyon*, *6*(03247), 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03247>
- He, S., Yang, X., He, Z., & Baligar, V. C. (2017). Morphological and Physiological Responses of Plants to Cadmium Toxicity: A Review. *Pedosphere*, *27*(3), 421–438. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(17\)60339-4](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(17)60339-4)
- Huang, R., Dong, M., Mao, P., Zhuang, P., Paz-Ferreiro, J., Li, Y., Li, Y., Hu, X., Netherway, P., & Li, Z. (2020). Evaluation of phytoremediation potential of five Cd (hyper)accumulators in two Cd contaminated soils. *Science of the Total Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137581>
- Ismael, M. A., Elyamine, A. M., Moussa, M. G., Cai, M., Zhao, X., & Hu, C. (2019). Cadmium in plants: uptake, toxicity, and its interactions with selenium fertilizers. *Metallomics*, *11*(2), 255–277. <https://doi.org/10.1039/C8MT00247A>

- Khalid, H., Zia-ur-Rehman, M., Naeem, A., Khalid, M. U., Rizwan, M., Ali, S., Umair, M., & Sohail, M. I. (2019). *Solanum nigrum* L.: A Novel Hyperaccumulator for the Phyto-Management of Cadmium Contaminated Soils. *Cadmium Toxicity and Tolerance in Plants: From Physiology to Remediation*, 451–477.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814864-8.00018-8>
- Koul, B., & Taak, P. (2018). Chemical Methods of Soil Remediation. *Biotechnological Strategies for Effective Remediation of Polluted Soils*, 77–84.
https://doi.org/10.1007/978-981-13-2420-8_4
- Kubier, A., Wilkin, R. T., & Pichler, T. (2019). Cadmium in soils and groundwater: A review. *Applied Geochemistry*, 108, 104388.
<https://doi.org/10.1016/J.APGEOCHEM.2019.104388>
- Liu, J., Zhang, H., Zhang, Y., & Chai, T. (2013). Silicon attenuates cadmium toxicity in *Solanum nigrum* L. by reducing cadmium uptake and oxidative stress. *Plant physiology and biochemistry : PPB*, 68, 1–7.
<https://doi.org/10.1016/J.PLAPHY.2013.03.018>
- López Aguilar, R., Murillo Amador, B., Benson Rosas, M., López Arce, E., & Valle Meza, G. (2002). *Manual De Análisis Químicos De Suelos* (p. 67).
[https://cibnor.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1001/2065/1/MANUAL DE ANÁLISIS QUÍMICOS DE SUELOS.PDF](https://cibnor.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1001/2065/1/MANUAL_DE_ANALISIS_QUIMICOS_DE_SUELOS.PDF)
- Lux, A., Martinka, M., Vaculík, M., & White, P. J. (2011). Root responses to cadmium in the rhizosphere: a review. *Journal of Experimental Botany*, 62(1), 21–37.
<https://doi.org/10.1093/JXB/ERQ281>
- Mahajan, P., & Kaushal, J. (2018). Role of Phytoremediation in Reducing Cadmium Toxicity in Soil and Water. *Journal of Toxicology*, 2018.
<https://doi.org/10.1155/2018/4864365>
- Matanzas, N., Afif, E., Díaz, T. E., & Gallego, J. R. (2021). Phytoremediation Potential of Native Herbaceous Plant Species Growing on a Paradigmatic Brownfield Site. *Water, Air, and Soil Pollution*, 232(7), 1–14. <https://doi.org/10.1007/S11270-021-05234-9/FIGURES/3>
- McCutcheon, S. C., & Jørgensen, S. E. (2008). Phytoremediation. En *Encyclopedia of Ecology, Five-Volume Set* (pp. 2751–2766). Academic Press.

<https://doi.org/10.1016/B978-008045405-4.00069-0>

- Muszyńska, E., Hanus-Fajerska, E., & Ciarkowska, K. (2018). Studies on lead and cadmium toxicity in *Dianthus carthusianorum* calamine ecotype cultivated in vitro. *Plant Biology*, 20(3), 474–482. <https://doi.org/10.1111/PLB.12712>
- Pisco, R. R., Jiménez, D. G., & Cruz, D. B. (2018). Fitoextracción de cadmio con hierba mora (*Solanum nigrum* L.) en suelos cultivados con cacao (*Theobroma cacao* L.). *Acta Agronómica*, 67(3), 420–424. <https://doi.org/10.15446/ACAG.V67N3.68536>
- Rahman, S. U., Xuebin, Q., Riaz, L., Yasin, G., Shah, A. N., Shahzad, U., Jahan, M. S., Ditta, A., Bashir, M. A., Rehim, A., & Du, Z. (2021). The interactive effect of pH variation and cadmium stress on wheat (*Triticum aestivum* L.) growth, physiological and biochemical parameters. *PLOS ONE*, 16(7), e0253798. <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0253798>
- Raza, A., Habib, M., Kakavand, S. N., Zahid, Z., Zahra, N., Sharif, R., & Hasanuzzaman, M. (2020). Phytoremediation of Cadmium: Physiological, Biochemical, and Molecular Mechanisms. *Biology 2020*, Vol. 9, Page 177, 9(7), 177. <https://doi.org/10.3390/BIOLOGY9070177>
- Riaz, U., Athar, T., Mustafa, U., & Iqbal, R. (2022). Economic feasibility of phytoremediation. *Phytoremediation*, 481–502. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-89874-4.00025-X>
- Rizwan, M., Ali, S., Zia ur Rehman, M., Rinklebe, J., Tsang, D. C. W., Bashir, A., Maqbool, A., Tack, F. M. G., & Ok, Y. S. (2018). Cadmium phytoremediation potential of Brassica crop species: A review. *Science of The Total Environment*, 631–632, 1175–1191. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2018.03.104>
- Rodríguez Albarrcín, H. S., Darghan Contreras, A. E., & Henao, M. C. (2019). Spatial regression modeling of soils with high cadmium content in a cocoa producing area of Central Colombia. *Geoderma Regional*. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2019.e00214>
- Sánchez, G. (2016). *Ecotoxicología del cadmio suelos ricos en cadmio*. Universidad Complutense.
- Sarwar, N., Saifullah, Malhi, S. S., Zia, M. H., Naeem, A., Bibia, S., & Farida, G.

- (2010). Role of mineral nutrition in minimizing cadmium accumulation by plants. *Journal of the science of food and agriculture*, 90(6), 925–937.
<https://doi.org/10.1002/JSFA.3916>
- Shaari, N. E. M., Tajudin, M. T. F. M., Khandaker, M. M., Majrashi, A., Alenazi, M. M., Abdullahi, U. A., & Mohd, K. S. (2022). Cadmium toxicity symptoms and uptake mechanism in plants: a review. *Brazilian Journal of Biology*, 84(252143), 1–17. <https://doi.org/10.1590/1519-6984.252143>
- Shi, P., Zhu, K., Zhang, Y., & Chai, T. (2016). Growth and Cadmium Accumulation of *Solanum nigrum* L. Seedling were Enhanced by Heavy Metal-Tolerant Strains of *Pseudomonas aeruginosa*. *Water, Air, & Soil Pollution* 2016 227:12, 227(12), 1–11. <https://doi.org/10.1007/S11270-016-3167-6>
- Song, X., Yue, X., Chen, W., Jiang, H., Han, Y., & Li, X. (2019). Detection of cadmium risk to the photosynthetic performance of Hybrid pennisetum. *Frontiers in Plant Science*, 10, 798. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2019.00798/BIBTEX>
- Song, Y., Jin, L., & Wang, X. (2017). Cadmium absorption and transportation pathways in plants. *International journal of phytoremediation*, 19(2), 133–141.
<https://doi.org/10.1080/15226514.2016.1207598>
- Sun, Y., Zhou, Q., Wang, L., & Liu, W. (2009). Cadmium tolerance and accumulation characteristics of *Bidens pilosa* L. as a potential Cd-hyperaccumulator. *Journal of Hazardous Materials*, 161(2–3), 808–814.
<https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2008.04.030>
- Vanderschueren, R., Argüello, D., Blommaert, H., Montalvo, D., Barraza, F., Maurice, L., Schreck, E., Schulin, R., Lewis, C., Vazquez, J. L., Umaharan, P., Chavez, E., Sarret, G., & Smolders, E. (2021). Mitigating the level of cadmium in cacao products: Reviewing the transfer of cadmium from soil to chocolate bar. *Science of The Total Environment*, 781, 146779.
<https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2021.146779>
- Wade, J., Ac-Pangan, M., Favoretto, V. R., Taylor, A. J., Engeseth, N., & Margenot, A. J. (2022). Drivers of cadmium accumulation in *Theobroma cacao* L. beans: A quantitative synthesis of soil-plant relationships across the Cacao Belt. *PLOS ONE*, 17(2), e0261989. <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0261989>

- Walkley, A., & Black, I. (1934). Un examen del método degtjareff para determinar la materia orgánica del suelo y una modificación propuesta en el método de titulación con ácido crómico. *Ciencia del suelo*, 37, 29–38.
- Wang, G., Su, M. Y., Chen, Y. H., Lin, F. F., Luo, D., & Gao, S. F. (2006). Transfer characteristics of cadmium and lead from soil to the edible parts of six vegetable species in southeastern China. *Environmental pollution (Barking, Essex : 1987)*, 144(1), 127–135. <https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2005.12.023>
- Yan, A., Wang, Y., Tan, S. N., Mohd Yusof, M. L., Ghosh, S., & Chen, Z. (2020). Phytoremediation: A Promising Approach for Revegetation of Heavy Metal-Polluted Land. *Frontiers in Plant Science*, 11, 359. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2020.00359/BIBTEX>
- Ying, R. R., Qiu, R. L., Tang, Y. T., Hu, P. J., Qiu, H., Chen, H. R., Shi, T. H., & Morel, J. L. (2010). Cadmium tolerance of carbon assimilation enzymes and chloroplast in Zn/Cd hyperaccumulator *Picris divaricata*. *Journal of Plant Physiology*, 167(2), 81–87. <https://doi.org/10.1016/J.JPLPH.2009.07.005>
- Zhang, W., Zhao, Y., Xu, Z., Huang, H., Zhou, J., & Yang, G. (2020). Morphological and Physiological Changes of *Broussonetia papyrifera* Seedlings in Cadmium Contaminated Soil. *Plants 2020, Vol. 9, Page 1698*, 9(12), 1698. <https://doi.org/10.3390/PLANTS9121698>
- Zhi, Y., Zhou, Q., Leng, X., & Zhao, C. (2020). Mechanism of Remediation of Cadmium-Contaminated Soil With Low-Energy Plant Snapdragon. *Frontiers in Chemistry*, 8, 222. <https://doi.org/10.3389/FCHEM.2020.00222>
- Zhu, T., Li, L., Duan, Q., Liu, X., & Chen, M. (2020). Progress in our understanding of plant responses to the stress of heavy metal cadmium. <https://doi.org/10.1080/15592324.2020.1836884>, 16(1). <https://doi.org/10.1080/15592324.2020.1836884>

VII. ANEXOS

Anexo 1. Constancia de determinación botánica de las dos especies herbáceas.



UNIVERSIDAD NACIONAL
TORIBIO RODRIGUEZ DE
MENDOZA DE AMAZONAS



Acto del Fortalecimiento de la Soberanía Nacional

CONSTANCIA DE DETERMINACIÓN BOTÁNICA

A solicitud de la Srta. Nuri Carito Vilca Valqui, se proporciona la identidad del espécimen indicado, con la sigla consignada.

La información proporcionada por el solicitante sobre las muestras es:

Lugar de colección : Copallin
Distrito : Copallin
Provincia : Bagua
Región : Amazonas
Altitud : 821-828m s.n.m
Coordenadas : 787524
9369984
Colector : Nuri Carito Vilca Valqui

N° COL	NOMBRE CIENTÍFICO	FAMILIA
C-001	<i>Bidens pilosa</i> L.	ASTERACEAE
C-002	<i>Solanum</i> sp.	SOLANACEAE



Determinador: **Elis Pariente Mondragón, Ing.Fer. M.Sc.**
Director del Dpto. Agronomía, Agroindustrial y Forestal
Director del Laboratorio de Dendrología y Herbario UNTRM (KUE LAP).

Anexo 2. Análisis físico y químico de los sustratos.

	 UNIVERSIDAD NACIONAL TORIBIO RODRIGUEZ DE MENDOZA DE AMAZONAS	Código: CCFG - 036	Versión: 01
INFORME DE ENSAYO N° 496		Página: /	

1. DATOS :
Solicitante : PROYECTO FITOCD

Departamento : AMAZONAS
Provincia : CHACHAPOYAS
Distrito : CHACHAPOYAS

Localidad :
N. Parcela :
Cod. Muestra : 1 TURBA, 1 T. AGRI, 1/2 ARENA
Fecha : 13/05/21

2. RESULTADO DEL ANÁLISIS SOLICITADO CARACTERIZACIÓN

Lab	Número de Muestra	pH (1.1)	C E (1.1) dSm	p	K	C	M.O	N	Análisis Mecánico			Clase textural	CIC	Cationes Cambiadas					Suma de Cationes	Suma de Bases	% Sal De Bases
									Arena	Limo	Arcilla			Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Al ³⁺ + H ⁺			
496	1 TURBA, 1 T. AGRI, 1/2 ARENA	5.53	0.31	5.14	173.32	3.75	6.47	0.32	78.0	10.0	12.0	Fr A	14.40	10.36	1.55	0.45	0.04	0.00	12.39	12.39	86

A = Arena ; A Fr = Arena Franca ; Fr A = Franco Arenoso ; Fr = Franco ; Fr L = Franco Limoso ; L = Limoso ; Fr Ar A = Franco Arcillo Arenoso ; Fr Ar = Franco Arcilloso ; Fr Ar L = Franco Arcillo Limoso ; Ar A = Arcillo Arenoso ; Ar L = Arcillo Limoso ; Ar = Arcilloso

Nota: Cabe resaltar que la muestra tomada en campo, no fue recolectada por el personal del laboratorio.

Los resultados presentados son válidos únicamente para la muestra ensayada, queda prohibida la reproducción total o parcial de este informe sin la autorización escrita de LABISAG.
Los resultados no pueden ser usados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

UNIVERSIDAD NACIONAL
TORIBIO RODRIGUEZ DE MENDOZA DE AMAZONAS
LABISAG

BI GO JE SUS RASCÓN BARRIOS
RESPONSABLE DE LABISAG

UNIVERSIDAD NACIONAL
TORIBIO RODRIGUEZ DE MENDOZA DE AMAZONAS
LABISAG

ENGR CHACABE VELA
RESPONSABLE DEL ÁREA DE SUELOS LABISAG

Recibi Conforme:
Nombre:
DNI:
Fecha y Hora:
Firma de Conformidad

Calle Higos Uno N° 342-350-356 - Calle Universitaria N° 304 - Chachapoya - Amazonas - Perú
labisag@untra.edu.pe / labisag@info-ces.edu.pe

	 UNIVERSIDAD NACIONAL TORIBIO RODRIGUEZ DE MENDOZA DE AMAZONAS	Código: CCFG - 036	Versión: 01
INFORME DE ENSAYO N° 495		Página: /	

1. DATOS :
Solicitante : PROYECTO FITOCD

Departamento : AMAZONAS
Provincia : CHACHAPOYAS
Distrito : CHACHAPOYAS

Localidad :
N. Parcela :
Cod. Muestra : 1 TURBA, 1 T. AGRI, 1 ARENA
Fecha : 13/05/21

2. RESULTADO DEL ANÁLISIS SOLICITADO CARACTERIZACIÓN

Lab	Número de Muestra	pH (1.1)	C E (1.1) dSm	p	K	C	M.O	N	Análisis Mecánico			Clase textural	CIC	Cationes Cambiadas					Suma de Cationes	Suma de Bases	% Sal De Bases
									Arena	Limo	Arcilla			Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Al ³⁺ + H ⁺			
495	1 TURBA, 1 T. AGRI, 1 ARENA	6.27	0.23	5.81	103.82	3.25	5.60	0.28	80.0	8.0	12.0	Fr A	15.20	12.59	1.19	0.23	0.03	0.07	14.12	14.05	92

A = Arena ; A Fr = Arena Franca ; Fr A = Franco Arenoso ; Fr = Franco ; Fr L = Franco Limoso ; L = Limoso ; Fr Ar A = Franco Arcillo Arenoso ; Fr Ar = Franco Arcilloso ; Fr Ar L = Franco Arcillo Limoso ; Ar A = Arcillo Arenoso ; Ar L = Arcillo Limoso ; Ar = Arcilloso

Nota: Cabe resaltar que la muestra tomada en campo, no fue recolectada por el personal del laboratorio.

Los resultados presentados son válidos únicamente para la muestra ensayada, queda prohibida la reproducción total o parcial de este informe sin la autorización escrita de LABISAG.
Los resultados no pueden ser usados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

UNIVERSIDAD NACIONAL
TORIBIO RODRIGUEZ DE MENDOZA DE AMAZONAS
LABISAG

BI GO JE SUS RASCÓN BARRIOS
RESPONSABLE DE LABISAG

UNIVERSIDAD NACIONAL
TORIBIO RODRIGUEZ DE MENDOZA DE AMAZONAS
LABISAG

ENGR CHACABE VELA
RESPONSABLE DEL ÁREA DE SUELOS LABISAG

Recibi Conforme:
Nombre:
DNI:
Fecha y Hora:
Firma de Conformidad

Calle Higos Uno N° 342-350-356 - Calle Universitaria N° 304 - Chachapoya - Amazonas - Perú
labisag@untra.edu.pe / labisag@info-ces.edu.pe

Anexo 3. Panel fotográfico

Figura 11.

Instalación del experimento en el invernadero de la UNTRM.



Figura 12.

Limpieza de las partes vegetales.



Figura 13.

Calcinado de las muestras en una mufla.



Figura 14.

Preparación de las muestras, para ser corridos en el espectrofotómetro.



Anexo 4. Entrevista a investigadores relacionado al tema

**UNIVERSIDAD NACIONAL TORIBIO RODRIGUEZ DE MENDOZA DE
AMAZONAS**



**TÍTULO DE LA INVESTIGACIÓN:
FITORREMEDIACIÓN DE CADMIO CON ESPECIES HERBÁCEAS EN
DIFERENTES TIPOS DE SUELO EN CONDICIONES DE INVERNADERO,
AMAZONAS.**

Nombre del entrevistado: Karol Brighton Rubio Rojas

Ocupación: Asistente de investigación

Cargo:

**Agradecemos mucho la voluntad de participar en este estudio y apreciamos su
colaboración**

Le reiteramos que:

Su participación es voluntaria.

La información que nos proporcione es estrictamente confidencial.

Febrero, 2022

ENTREVISTA PARA EL ESTUDIO CUALITATIVO DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

1. ¿Cuáles son los efectos (económicos, sociales, ambientales) del cadmio en la producción y comercialización nacional de cacao?

- La presencia de cadmio en el cacao ha generado preocupación para los productores de cacao ya que ha significado el cierre de mercados como el europeo. Lo que trae efectos económicos directos a los productores ya que afecta sus ventas.
- Esto desanima a los productores de cacao a seguir invirtiendo en su cultivo, lo que conlleva al abandono de parcelas y la migración hacia otras actividades económicas.
- En el ámbito ambiental la contaminación por cadmio de los suelos origina que estos suelos sean poco aptos para la instalación de cultivos como cacao, además del peligro de contaminación por ingesta y deterioro de la salud humana.

2. ¿Qué estrategias se pueden adoptar para minimizar el riesgo de acumulación de cadmio en los granos de cacao y sus derivados?

- Remediación de suelos mediante enmiendas, o la extracción de este metal por vías de la fito-extracción o secuestro del metal por microorganismos.
- Además, la búsqueda de variedades de cacao que tengan bajos índices de bioacumulación y traslocación de cadmio es una buena alternativa.

3. ¿Cree que la fitorremediación mediante el uso de especies herbáceas puede ser una medida que contribuya al desarrollo sustentable/sostenible del cultivo de cacao?

- El uso de plantas como agente de biorremediación de suelos contaminados por cadmio es una excelente alternativa. Sin embargo, para que la contaminación por cadmio no sea una amenaza para la producción sostenible de cacao se deberá integrar estrategias de manejo para que no afecte al grano y por consecuencia la economía de productor.

**UNIVERSIDAD NACIONAL TORIBIO RODRIGUEZ DE MENDOZA DE
AMAZONAS**



**TÍTULO DE LA INVESTIGACIÓN:
FITORREMEDIACIÓN DE CADMIO CON ESPECIES HERBÁCEAS EN
DIFERENTES TIPOS DE SUELO EN CONDICIONES DE INVERNADERO,
AMAZONAS.**

Nombre del entrevistado: Jegnes B. Meléndez Mori

Ocupación:

Cargo:

**Agradecemos mucho la voluntad de participar en este estudio y apreciamos su
colaboración**

Le reiteramos que:

Su participación es voluntaria.

La información que nos proporcione es estrictamente confidencial.

Febrero de 2022

ENTREVISTA PARA EL ESTUDIO CUALITATIVO DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

1. ¿Cuáles son los efectos (económicos, sociales, ambientales) del cadmio en la producción y comercialización nacional de cacao?

La presencia de cadmio en los granos del cacao ha causado gran preocupación porque puede tener graves consecuencias para el sector cacaotero. Actualmente, una de las consecuencias son las normativas implantadas por la Unión Europea, cuya entrada en vigor restringe los procesos de exportación. Esta regulación no solo afecta la economía nacional, sino que también afecta los ingresos de miles de productores de cacao para satisfacer sus necesidades básicas, afectando así su calidad de vida.

2. ¿Qué estrategias se pueden adoptar para minimizar el riesgo de acumulación de cadmio en los granos de cacao y sus derivados?

Para reducir la acumulación de cadmio en el cacao en grano y sus derivados, es necesario implementar de manera integral diferentes estrategias, tales como:

- Utilizar material genético con baja afinidad por la absorción de cadmio.
- Desarrollar un plan de cultivo (manejo agronómico)
- Implementar estrategias para inmovilizar
- Implementación de tecnología de fitoextracción de metales pesados.
- Mejorar la tecnología postcosecha.

3. ¿Cree que la fitorremediación mediante el uso de especies herbáceas puede ser una medida que contribuya al desarrollo sustentable/sostenible del cultivo de cacao?

La fitorremediación es una tecnología prometedora con gran potencial para la restauración de suelos contaminados, pero se debe considerar que el éxito (sostenibilidad y sustentabilidad) de las prácticas de remediación dependerá del manejo de las plantas cosechadas, las cuales deben ser tratadas como residuos tóxicos y peligrosos. Lamentablemente, el país aún no está preparado para afrontar estos desafíos.

**UNIVERSIDAD NACIONAL TORIBIO RODRIGUEZ DE MENDOZA DE
AMAZONAS**



**TÍTULO DE LA INVESTIGACIÓN:
FITORREMEDIACIÓN DE CADMIO CON ESPECIES HERBÁCEAS EN
DIFERENTES TIPOS DE SUELO EN CONDICIONES DE INVERNADERO,
AMAZONAS.**

**Nombre del entrevistado: Víctor Hugo Gómez Ramírez
Ocupación: Docente - Investigador
Cargo: ----**

**Agradecemos mucho la voluntad de participar en este estudio y apreciamos su
colaboración**

Le reiteramos que:

Su participación es voluntaria.

La información que nos proporcione es estrictamente confidencial.

Febrero, 2022

ENTREVISTA PARA EL ESTUDIO CUALITATIVO DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

1. ¿Cuáles son los efectos (económicos, sociales, ambientales) del cadmio en la producción y comercialización nacional de cacao?

Los efectos económicos pueden verse desde dos perspectivas, de manera microeconómica el afectado sería el agricultor, pues debido a las concentraciones de Cd por encima de los niveles permitidos, sus productos no podrán ser comercializados afectando significativamente sus ingresos. Macroeconómicamente, las exportaciones asociadas al cacao disminuyen significativamente, cerrándose así diferentes mercados internacionales.

Socialmente podría considerarse el efecto negativo sobre la percepción del cacao, debido al rechazo del producto de los mercados internacionales. Esta percepción negativa podría hacer que los productores opten por un cambio de cultivo inclusive a corto plazo.

Ambientalmente el efecto de concentraciones significativas de Cd en los sistemas de cultivo de cacao sería negativo, ya que este es un elemento traza no necesario para el desarrollo de las plantas, pero que podría generar efectos dañinos en el sistema suelo-planta. Esto es más peligroso aún debido a que a través de los cultivos este elemento podría ingresar a la cadena alimentaria, pudiendo originar daños considerables a la salud de las personas.

2. ¿Qué estrategias se pueden adoptar para minimizar el riesgo de acumulación de cadmio en los granos de cacao y sus derivados?

Las estrategias tienen que estar consideradas en función a las investigaciones ya publicadas sobre esta problemática. Estrategias como tratar de reducir la disponibilidad de Cd en los suelos (si es que hubiese Cd en los suelos), de tal manera que la planta no pueda absorberlo; esto en caso que los suelos ya tengan concentraciones elevadas de este elemento. Otra alternativa sería también considerar suelos de cultivo con concentraciones mínimas de Cd, lo cual minimizaría la posibilidad de absorción. La utilización de fertilizantes con concentraciones libres de Cd sería una alternativa también, ya que los fertilizantes o enmiendas pueden ser un aporte de Cd que muchas veces no se está considerando.

3. ¿Cree que la fitorremediación mediante el uso de especies herbáceas puede ser una medida que contribuya al desarrollo sustentable/sostenible del cultivo de cacao?

La fitorremediación es una alternativa emergente para el tratamiento de suelos con concentraciones elevadas de elementos traza como el Cd. Las investigaciones tendrían que estar enfocadas a especies fitorremediadoras autóctonas. Esta alternativa podría considerarse como una posible solución en la región, pero hay que investigar sobre ello. También es importante considerar que hacer luego de que la especie remediadora ha cumplido el objetivo, porque si después de su periodo vegetativo no tiene una disposición adecuada, el Cd podría regresar nuevamente al suelo.

**UNIVERSIDAD NACIONAL TORIBIO RODRIGUEZ DE MENDOZA DE
AMAZONAS**



**TÍTULO DE LA INVESTIGACIÓN:
FITORREMEDIACIÓN DE CADMIO CON ESPECIES HERBÁCEAS EN
DIFERENTES TIPOS DE SUELO EN CONDICIONES DE INVERNADERO,
AMAZONAS.**

**Nombre del entrevistado: Ligia Magali García Rosero
Ocupación: Profesora
Cargo: Docente**

**Agradecemos mucho la voluntad de participar en este estudio y apreciamos su
colaboración**

Le reiteramos que:

Su participación es voluntaria.

La información que nos proporcione es estrictamente confidencial.

Febrero, 2022

ENTREVISTA PARA EL ESTUDIO CUALITATIVO DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

1. ¿Cuáles son los efectos (económicos, sociales, ambientales) del cadmio en la producción y comercialización nacional de cacao?

Económicos: Pese a que, no se han demostrado de que existan efectos directos de muertes o afectaciones humanas por altas cantidades de cadmio en granos de cacao y sus derivados, el sólo hecho de una regulación con valores arbitrarios para las cantidades mínimas de Cd permitidas, existen factores económicos que tienen afectaciones, por ejemplo, a nivel país disminución de divisas extranjeras al exportar en menos cantidades, a nivel sistemas de predios medianos y pequeños, la pequeña economía deja de percibir ingresos, o los percibe al límite de sus costos de producción, es decir se reduce o elimina sus ganancias.

Sociales: Desconozco el panorama social, pero quizás basados en esta problemática, a nivel social, buscarán fortalecerse de alguna manera para hacer frente a la problemática.

Ambientales: Muchas veces, se plantean como solución algunas prácticas como aplicaciones de fertilizantes o modificaciones de ph, etc Pero, si son erróneas, puede alterar factores de contaminación ambiental en cuanto a contaminación. No siempre el problema se soluciona de esa manera, quizás búsqueda de nuevas rutas de exportación que no sea UE, sean necesarias, Japón por ejemplo.

PDTA: Considero que es importante tratar también problemas ecológicos, como pérdida de diversidad de cacao en búsqueda de ecotipos resistentes, tal como pasó en el caso de quinua hace algunos años.

2. ¿Qué estrategias se pueden adoptar para minimizar el riesgo de acumulación de cadmio en los granos de cacao y sus derivados?

Recuerda que, el cacao es fitoextractor, fitorremediación

3. ¿Cree que la fitorremediación mediante el uso de especies herbáceas puede ser una medida que contribuya al desarrollo sustentable/sostenible del cultivo de cacao?

La fitorremediación mediante el uso de especies herbáceas puede ser una medida sostenible para reducir el impacto ambiental en suelos degradados por sistemas como el de mineras que afectan suelos.

Sin embargo, en el caso de cacao, futuras investigaciones son necesarias, imagino que se necesita conocer primero, el “poder” de extracción que tienen especies herbáceas cuando están en asociación con cultivos de cacao, por ejemplo, recordando que el nivel de extracción podría depender del genotipo. Falta conocer el nivel de competencia de nutrientes por ejemplo y por fase fenológica, es decir, Podemos proponer el uso de herbáceas en asociación con cacao, siempre y cuando sepamos que, en la fase de formación del fruto, las herbáceas sean las que absorban el cadmio del suelo antes que el mismo cacao, y que a la vez sólo le gane absorbiendo cadmio, y mas no absorbiendo el resto de estos nutrientes (porque si las herbáceas absorben más rápido otros elementos, a la final pueden competir con el cacao en todos los nutrientes)