

UNIVERSIDAD CATÓLICA SEDES SAPIENTIAE
FACULTAD DE INGENIERÍA AGRARIA



Efecto de las micorrizas arbusculares y compost en la absorción de cadmio y crecimiento vegetal del cacao en la Región San Martín

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO AMBIENTAL**

AUTORES

Neiber Cabrera Tarrillo

Emma Kelmith Huamán Julca

ASESOR

Geomar Vallejos Torres

Rioja, Perú

2022

METADATOS COMPLEMENTARIOS**Datos de los Autores****Autor 1**

Nombres	
Apellidos	
Tipo de documento de identidad	
Número del documento de identidad	
Número de Orcid (opcional)	

Autor 2

Nombres	
Apellidos	
Tipo de documento de identidad	
Número del documento de identidad	
Número de Orcid (opcional)	

Autor 3

Nombres	
Apellidos	
Tipo de documento de identidad	
Número del documento de identidad	
Número de Orcid (opcional)	

Autor 4

Nombres	
Apellidos	
Tipo de documento de identidad	
Número del documento de identidad	
Número de Orcid (opcional)	

Datos de los Asesores**Asesor 1**

Nombres	
Apellidos	
Tipo de documento de identidad	
Número del documento de identidad	
Número de Orcid (Obligatorio)	

Asesor 2

Nombres	
Apellidos	
Tipo de documento de identidad	
Número del documento de identidad	
Número de Orcid (Obligatorio)	

Datos del Jurado

Presidente del jurado

Nombres	
Apellidos	
Tipo de documento de identidad	
Número del documento de identidad	

Segundo miembro

Nombres	
Apellidos	
Tipo de documento de identidad	
Número del documento de identidad	

Tercer miembro

Nombres	
Apellidos	
Tipo de documento de identidad	
Número del documento de identidad	

Datos de la Obra

Materia*	
Campo del conocimiento OCDE Consultar el listado:	
Idioma	
Tipo de trabajo de investigación	
País de publicación	
Recurso del cual forma parte (opcional)	
Nombre del grado	
Grado académico o título profesional	
Nombre del programa	
Código del programa Consultar el listado:	

***Ingresar las palabras clave o términos del lenguaje natural (no controladas por un vocabulario o tesauro).**



FACULTAD DE INGENIERÍA AGRARIA

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

ACTA N° 023 - 2023/UCSS/FIA/DI

Siendo las 10:00 a.m. del día 24 de abril de 2023, a través de la plataforma virtual zoom de la Universidad Católica Sedes Sapientiae, el Jurado de Tesis, integrado por:

- | | |
|-----------------------------------|-----------------|
| 1. Manuel Antonio Trelles Velasco | presidente |
| 2. Oswaldo Clever Villena Carpio | primer miembro |
| 3. Yuri Holsin Calle Cheje | segundo miembro |
| 4. Geomar Vallejos Torres | asesor |

Se reunieron para la sustentación virtual de la tesis titulada **Efecto de las micorrizas arbusculares y compost en la absorción de cadmio y crecimiento vegetal del cacao en la Región San Martín** que presentan los bachilleres en Ciencias Ambientales, **Emma Kelmith Huamán Julca y Neiber Cabrera Tarrillo**, cumpliendo así con los requerimientos exigidos por el reglamento para la modalidad de titulación; la presentación y sustentación de un trabajo de investigación original, para obtener el Título Profesional de **Ingeniero Ambiental**.

Terminada la sustentación y luego de deliberar, el Jurado acuerda:

APROBAR

DESAPROBAR

La tesis, con el calificativo de **BUENA** y eleva la presente Acta al Decanato de la Facultad de Ingeniería Agraria, a fin de que se declare EXPEDITA para conferirle el TÍTULO de INGENIERO AMBIENTAL.

Lima, 24 de abril de 2023.

Manuel Antonio Trelles Velasco
PRESIDENTE

Oswaldo Clever Villena Carpio
1° MIEMBRO

Yuri Holsin Calle Cheje
2° MIEMBRO

Geomar Vallejos Torres
ASESOR

Anexo 2

CARTA DE CONFORMIDAD DEL ASESOR(A) DE TESIS / INFORME ACADÉMICO/ TRABAJO DE INVESTIGACIÓN/ TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL CON INFORME DE EVALUACIÓN DEL SOFTWARE ANTIPLAGIO

Rioja, 28 de Octubre del 2023

Señor(a),

Wilfredo Mendoza Caballero

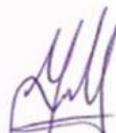
Jefe del Departamento de Investigación/ Coordinador Académico de Unidad de Posgrado
Facultad / Escuela **de Ingeniería Agraria** - UCSS

Reciba un cordial saludo.

Sirva el presente para informar que **la tesis** / informe académico/ trabajo de investigación/ trabajo de suficiencia profesional, bajo mi asesoría, con título: Efecto de las micorrizas arbusculares y compost en la absorción de cadmio y crecimiento vegetal del cacao en la Región San Martín , presentado por Neiber Cabrera Tarrillo y Emma Kelmith Huamán Julca con código de estudiante 2014101503, 2014101479 y DNI 74435333, 75873910 para optar **el título profesional**/ grado académico de Ingeniero Ambiental, ha sido revisado en su totalidad por mi persona y **CONSIDERO** que el mismo se encuentra **APTO** para ser sustentado ante el Jurado Evaluador.

Asimismo, para garantizar la originalidad del documento en mención, se le ha sometido a los mecanismos de control y procedimientos antiplagio previstos en la normativa interna de la Universidad, **cuyo resultado alcanzó un porcentaje de similitud de 0 %**. Por tanto, en mi condición de asesor(a), firmo la presente carta en señal de conformidad y **adjunto el informe de similitud del Sistema Antiplagio Turnitin**, como evidencia de lo informado.

Sin otro particular, me despido de usted. Atentamente,



Firma del Asesor (a)

DNI N°: 01162440

ORCID: 0000-0003-3440-6802

Facultad de Ingeniería Agraria

UCSS

(*) De conformidad con el artículo 8°, del Capítulo 3 del Reglamento de Control Antiplagio e Integridad Académica para trabajos para optar grados y títulos, aplicación del software antiplagio en la UCSS, se establece lo siguiente:

Artículo 8°. Criterios de evaluación de originalidad de los trabajos y aplicación de filtros

El porcentaje de similitud aceptado en el informe del software antiplagio para trabajos para optar grados académicos y títulos profesionales, **será máximo de veinte por ciento (20%) de su contenido, siempre y cuando no implique copia o indicio de copia.**

DEDICATORIA

Agradezco a mis padres por formarme en quien soy hoy, dándome la valiosa oportunidad de completar mis estudios superiores y apoyándome siempre para lograr mis sueños.

A mis hermanas, por su apoyo incondicional que ha sido invaluable en cada paso de mi camino, guiándome con sus sabios consejos y motivándome a ser una persona íntegra y virtuosa.

Emma Kelmith Huamán Julca

Agradezco a la Divina Providencia por permitirme alcanzar este logro, dándome salud y los medios para progresar diariamente en esta actividad investigativa, siempre bajo su bondad y el amor ilimitado de Él.

A mis queridos padres, por su apoyo constante. Valoro sus sabios consejos, sus sólidos valores y motivación persistente que me han ayudado a ser una persona íntegra. Me inspiran su perseverancia y constancia, y agradezco especialmente su amor incondicional que me impulsa a seguir adelante.

Quisiera agradecer al Dr. Geomar Vallejos Torres, por apoyarme, motivarme y guiarme durante todo el proceso de investigación, brindándome sus conocimientos y, sobre todo, siendo un amigo comprensivo y considerado. Gracias a la cooperación de todos, pudimos concluir este proyecto de investigación de manera exitosa.

Neiber Cabrera Tarrillo

AGRADECIMIENTOS

Sobre todo, quisiera expresar mi agradecimiento a Dios por darme vida y amor incondicional, y por ser siempre mi guía.

A mis queridos padres y hermanas, les debo un agradecimiento especial, ya que sin su apoyo incondicional no podría de seguir creciendo académicamente.

Me gustaría agradecer a mi asesor Geomar Vallejos, un importante pilar en el perfeccionamiento de esta tesis.

A Henry Azula y a los amigos que me brindaron sus consejos para enriquecer la presente investigación, fueron un impulso invaluable para alcanzar esta meta tan anhelada.

Emma Kelmith Huamán Julca

Eterna gratitud a Dios por la vida que me ha dado, por permitirme estudiar ingeniería ambiental y por darme la comprensión y la capacidad para escribir este estudio de investigación.

Agradecer a mis padres por el constante apoyo y aliento incluso en tiempos difíciles. Su confianza y amor incondicional por mí es una valiosa motivación para alcanzar mis objetivos.

Finalmente, quisiera agradecer al Dr. Geomar Vallejos Torres, mi asesor para este proyecto de investigación.

Neiber Cabrera Tarrillo

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTOS.....	iii
ÍNDICE GENERAL.....	iv
ÍNDICE DE TABLAS.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	viii
ÍNDICE DE APÉNDICES.....	ix
RESUMEN.....	10
ABSTRACT.....	11
INTRODUCCIÓN.....	12
OBJETIVOS.....	15
Objetivo general.....	15
Objetivos específicos.....	15
CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO.....	16
1.1. Antecedentes.....	16
1.2. Bases teóricas especializadas.....	23
1.2.1. Origen del cacao.....	23
1.2.2. Características agronómicas del cacao.....	24
1.2.3. Efectos del cadmio en plantas.....	25
1.2.4. Cadmio en suelos.....	26
1.2.5. Simbiosis de micorrizas arbusculares en plantas.....	27
1.2.6. Micorrizas arbusculares y reducción de cadmio en el cultivo de cacao.....	28
1.2.7. Enmiendas orgánicas y su efecto en el transporte del cadmio hacia las plantas.....	29
1.2.8. Descomposición del compost.....	30
1.2.9. Características del compost.....	30
CAPÍTULO II. MATERIALES Y MÉTODOS.....	31
2.1. Diseño de la investigación.....	31
2.2. Lugar y fecha.....	31
2.3. Descripción del experimento.....	32
2.3.1. Caracterización fisicoquímica del compost.....	32
2.3.2. Preparación y desinfección del sustrato.....	33
2.3.3. Caracterización fisicoquímica del suelo por tratamiento.....	33
2.3.4. Aplicación de cloruro de cadmio y remoción de sustratos contaminados.....	34
2.3.5. Multiplicación de HMA.....	35

2.3.6. Inoculación con hongos micorrízicos arbusculares a semillas germinadas.....	35
2.3.7. Evaluación del crecimiento de las plantas	36
2.3.8. Proceso de extracción de plantas	37
2.4. Tratamientos	37
2.5. Unidades experimentales.....	38
2.6. Identificación de las variables y su mensuración	39
2.7. Diseño estadístico del experimento	44
2.8. Análisis estadístico de datos	45
2.9. Materiales y equipos.....	47
CAPÍTULO III: RESULTADOS	48
3.1. Caracterización del compost y sustrato	48
3.2. Crecimiento vegetal en lo que respecta a los HMA, cadmio y compost en plántones de cacao.....	49
3.3. Prueba de normalidad de datos	50
3.4. Colonización micorrízica relacionado con los HMA, cadmio y compost en plántones de cacao.....	51
3.4.1. Análisis de varianza para la colonización micorrízica	52
3.4.2. Prueba de Tukey para la colonización micorrízica.....	53
3.5. Longitud de micelio extra radical (cm) relacionado con los HMA, cadmio y compost en plántones de cacao.....	54
3.5.1. Análisis de varianza para la longitud de micelio extra radical	54
3.5.2. Prueba de Tukey para la longitud de micelio	55
3.6. Concentración de cadmio en suelos relacionado con los HMA y compost en plántones de cacao.....	56
3.7. Cadmio en raíces relacionado con los factores HMA, cadmio y compost en plántones de cacao.....	57
3.8. Cadmio en tallos relacionado con los factores HMA, cadmio y compost en plántones de cacao.....	59
3.8.1. Análisis de varianza para el cadmio en tallos.....	59
3.8.2. Prueba de Tukey para el cadmio en tallos	59
CAPÍTULO IV: DISCUSIÓN.....	61
4.1. Crecimiento vegetal relacionado con los HMA, cadmio y compost en plántones de cacao	
4.2. Colonización micorrízica (%) relacionado con los HMA, cadmio y compost en plántones	

de cacao	62
4.3. Longitud de micelio extra radical (cm) relacionado con los HMA, cadmio y compost en plantones de cacao.....	62
4.4. Cadmio en suelos (mg.kg-1) relacionado con los HMA, cadmio y compost en plantones de cacao	64
4.5. Cadmio en raíces de plantones de cacao (mg.kg-1) relacionado con los factores HMA, cadmio y compost en plantones de cacao	65
4.6. Cadmio en tallos de plantones de cacao (mg kg-1) relacionado con los factores HMA, cadmio y compost en plantones de cacao	65
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES	67
CAPÍTULO VI: RECOMENDACIONES	69
REFERENCIAS	70
TERMINOLOGÍA	86
APÉNDICES	88

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
<i>Tabla 1. Distribución de tratamiento en el experimento.....</i>	38
<i>Tabla 2. Identificación de Variables.....</i>	39
<i>Tabla 3. Descripción de los factores estudiados.....</i>	45
<i>Tabla 4. Resumen de la interacción de factores en estudio (AxBxC).....</i>	45
<i>Tabla 5. Diseño de ANOVA para arreglo factorial para el trabajo de investigación.....</i>	46
<i>Tabla 6. Análisis de cadmio y caracterización del compost.....</i>	48
<i>Tabla 7 Característica fisicoquímica de los sustratos muestreados por tratamiento.....</i>	49
<i>Tabla 8. Valores del crecimiento vegetal en relación con los HMA, cadmio y compost en plantones de caca.....</i>	49
<i>Tabla 9. Resultados de la prueba de normalidad de Shapiro Wilks.....</i>	51
<i>Tabla 10. Promedio de los datos de colonización y longitud de micelio en plantones de cacao.....</i>	52
<i>Tabla 11. Análisis de varianza (ANOVA) para la colonización micorrízica (%) relacionado los factores: Factor A: HMA; factor B: cadmio y factor C: compost.....</i>	53
<i>Tabla 12. Análisis de varianza (ANOVA) para el de micelio (cm) relacionado con los factores: Factor A: HMA; factor B: cadmio y factor C: compost.....</i>	55
<i>Tabla 13. Análisis de varianza no paramétrica de Kruskal-Wallis para valores de cadmio en suelo (mg.kg-1) relacionado con los factores: Factor A: HMA; factor B: cadmio y factor C: compost.....</i>	57
<i>Tabla 1. Análisis de varianza no paramétrica de Kruskal-Wallis para valores de cadmio en suelo (mg.kg-1) relacionado con los factores: Factor A: HMA; factor B: cadmio y factor C: compost.....</i>	58
<i>Tabla 2. Análisis de varianza (ANOVA) para el cadmio en tallo (mg.kg-1) relacionado con los factores: Factor A: HMA; Factor B: cadmio y Factor C: compost.....</i>	59

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
<i>Figura 1.</i> Principales zonas de producción de cacao en el Perú	24
<i>Figura 2.</i> Mapa de ubicación del estudio	32
<i>Figura 3.</i> Preparación del medio de crecimiento para el estudio	34
<i>Figura 4.</i> Preparación del cloruro de cadmio y aplicación al medio de crecimiento.....	35
<i>Figura 5.</i> Germinación y repique de semillas de cacao	36
<i>Figura 6.</i> Preparación de muestras para determinación de cadmio.....	37
<i>Figura 7.</i> Determinación de la colonización micorrízica.....	41
<i>Figura 8.</i> Determinación de la longitud de micelio extra radical.....	43
<i>Figura 9.</i> Preparación de muestras para análisis de cadmio en suelos, raíces y tallos en plantas de cacao	44
<i>Figura 10.</i> Efectos de la inoculación de HMA, compost y adición de Cd sobre el crecimiento vegetal de plantas de cacao	50
<i>Figura 11.</i> Efectos de la inoculación de HMA, compost y adición de Cd sobre la colonización micorrízica en plantas de cacao	54
<i>Figura 12.</i> Efectos de la inoculación de HMA, compost y adición de Cd sobre la longitud de micelio extra radical en plantones de cacao.....	56
<i>Figura 13.</i> Efectos de la inoculación de HMA, compost y adición de Cd sobre el de cadmio en tallos	60

ÍNDICE DE APÉNDICES

	Pág.
Apéndice 1. Análisis de caracterización física y química del compost empleado en el estudio	88
Apéndice 2. Análisis de caracterización física y química de los sustratos en los ocho tratamientos en estudio.....	89
Apéndice 3. Análisis de cadmio en suelos de plántones de cacao	90
Apéndice 4. Análisis de cadmio en raíces de plántones de cacao	91
Apéndice 5. Análisis de cadmio en tallos de plántones de cacao.....	92
Apéndice 6. Promedio de datos del contenido de cadmio en suelos, raíces y tallos	93

RESUMEN

Se examina el impacto de los hongos micorrízicos arbusculares (HMA) y la función del compost en la disminución de la absorción de cadmio y el crecimiento del “cacao” *Theobroma cacao*. La presencia de cadmio (Cd) afecta la calidad del cacao, en tal sentido, se evaluó el HMA y compost como inhibidores de la bioacumulación de este metal pesado. Se empleó un diseño completamente al azar (DCA) y arreglo trifactorial, para evaluar los HMA (A), el compost (B) y cadmio (C), en ocho tratamientos con seis repeticiones cada una (48 plantas). Determinando que tanto los HMA como el compost influyen de manera beneficiosa al crecimiento de las plantas ($T_6 = 11,55$, $T_7 = 15,15$, y $T_8 = 8,39$ %), en la concentración de cadmio en los tallos ($T_6 = 2,01$ % y $T_8 = 23,78$ %) menor que los resultados de un sustrato contaminado (T_5), así mismo, hubo influencias significativas en la colonización de las micorrizas y en la longitud del micelio. En conclusión, un sustrato formado por HMA y compost contribuye a reducir la bioacumulación del Cd en el “cacao”, mejorando la calidad de los productos derivados y los ingresos económicos de los cacaoteros de la región de San Martín.

Palabras Clave: *Enmienda orgánica, cloruro de cadmio, colonización, biorremediación.*

ABSTRACT

The impact of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) and the role of compost in reducing cadmium absorption and promoting the growth of *Theobroma cacao*, commonly known as "cacao" is examined. The presence of cadmium (Cd) negatively affects the quality of cacao. Hence, the AMF and compost were evaluated as inhibitors of the bioaccumulation of this heavy metal. A completely randomized design (CRD) with a three-factor arrangement was employed to assess the AMF (A), compost (B), and cadmium (C) in eight treatments, each with six replicates (48 plants). It was determined that both AMF and compost have a beneficial influence on plant growth ($T_6 = 11.55$, $T_7 = 15.15$, and $T_8 = 8.39\%$), and they resulted in lower cadmium concentrations in the stems ($T_6 = 2.01\%$ and $T_8 = 23.78\%$) compared to the outcomes of a contaminated substrate (T_5). Additionally, there were significant effects on mycorrhizal colonization and mycelium length. In conclusion, a substrate composed of AMF and compost helps reduce cadmium bioaccumulation in cacao, thus enhancing the quality of derived products and the economic returns for cacao farmers in the San Martín region.

Keywords: Organic amendment, cadmium chloride, colonization, bioremediation.

INTRODUCCIÓN

Las plantas de cacao brotan en las áreas pertenecientes a la selva tropical de América del Sur, especialmente alrededor de los ríos Putumayo, Napo y Caquetá que son afluentes del río Amazonas (Romero, 2016); por lo tanto, este territorio alberga una importante cantidad de la variedad genética de cacao (Osorio-Guarín *et al.*, 2017). Según el Ministerio de Agricultura y Riego [MINAGRI] (2019), el departamento de San Martín es responsable del 38 % de la producción en el Perú., además, dicha actividad tiene un alto valor económico, como se refleja en sus niveles de exportación. Durante el periodo 2013 – 2017, el grano de cacao experimentó un crecimiento promedio anual del 6,3 %, y su consolidación en el 2019 con un incremento de 189 %.

Las plantas de cacao tienen la aptitud para translocar los metales pesados presentes en el suelo a todas las partes que conforman su estructura vegetativa, superando los límites máximos permisibles (Mendoza-López *et al.*, 2021; Scaccabarozzi *et al.*, 2020; Barraza *et al.*, 2019). El Cd es un elemento tóxico para los humanos y puede afectar el sistema renal, reducir la densidad ósea (Alfvén *et al.*, 2000). Además, Hamid *et al.* (2019) señalan que ingresa al cuerpo humano por la ingesta de productos contaminados, lo que puede alterar el funcionamiento del hígado, los riñones, la placenta y los pulmones. La toxicidad del Cd en las plantas consigue afectar negativamente el proceso de germinación, el de la fotosíntesis y el desarrollo de las plantas, afectando el rendimiento agrícola (Qaswar *et al.*, 2017; Rizwan *et al.*, 2017).

En 2019, la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA) identificó el cacao como una primordial fuente de Cd en los seres humanos, lo que dio lugar al Reglamento (UE) N° 488/2014 (UE 2014) el cual regula la máxima concentración de Cd en el chocolate y los otros derivados del cacao. Para evitar efectos negativos en el cuerpo humano, es necesario impedir la bioacumulación de Cd por las plantas de cacao. En ese sentido, se ha evaluado que los (HMA) en combinación con aditivos orgánicos como la técnica idónea para la recuperación de los suelos contaminados, según Liu *et al.* (2018) y Madejón *et al.* (2021).

La presencia de Cd en los suelos ha sido un problema en los cultivos de cacao y ha generado preocupación por su ingesta en la dieta alimentaria. Para abordar este problema se ha propuesto varios métodos de reducción de Cd en el suelo: intercambio iónico, electrocinética, lavado de suelos, uso de nanomateriales, oxidación avanzada, biorremediación y aplicación de enmiendas (Rahim *et al.*, 2022). Entre las técnicas de remediación de los suelos contaminados con metales pesados, es la mezcla de HMA y compost ha mostrado resultados prometedores. Esta técnica permite la estabilidad de los metales pesados en el suelo, disminuyendo su biodisponibilidad e impidiendo su absorción en las partes vegetativas de las plantas (Hamid *et al.*, 2019), además, Los HMA también tienen un efecto directo en la mejora de la tolerancia de varias especies vegetales a los metales pesados, a través de estrategias de inmovilización y adsorción de metales pesados en sus hifas (Janeeshma y Puthur, 2020; Huang *et al.*, 2006). Es importante destacar que esta práctica es amigable con el medio ambiente y rentable (Bhaduri y Fulekar, 2012).

La región San Martín es conocida por su agricultura y destaca como una importante zona productora de cacao. En esta región se siembran principalmente dos tipos de variedad de cacao: el CCN5, que se caracteriza por su elevado beneficio, así como también, su resistencia a las plagas y enfermedades, pero no posee una buena calidad, y los finos de aroma (ITS, TSH, etc.), que son de alta calidad, pero más susceptibles a las plagas y tienen un menor volumen de producción. La absorción del Cd en el cacao viene influenciada por factores como la fertilización, la edad del árbol, el genotipo, el estado de nutrientes del suelo y las condiciones ambientales. En este contexto, las micorrizas han sido consideradas como biofertilizadores y biorremediadores de suelos.

Existe evidencia de altas cantidades de metales pesados, de cadmio (Cd) más precisamente en cultivos de cacao en algunas localidades del Perú. Por ejemplo, los cultivos de cacao en la región amazónica superan los límites establecidos tanto por las normas peruanas como por la europea (Oliva *et al.*, 2020). Además, se ha encontrado Cd en áreas sembradas de cacao localizadas a una elevación entre los 600 y 800 m.s.n.m en San Martín (Mendoza-López *et al.*, 2021) y en los cacaotales de Huánuco con $2,46 \text{ mg kg}^{-1}$ (Zug *et al.*, 2019). En ese sentido, la variedad de HMA's vinculados a las plantas de cacao puede representar una

solución para inmovilizar el cadmio y optimizar el desarrollo morfológico de las plantas, como sugiere Vallejos-Torres *et al.* (2022).

En esta investigación se evaluó el potencial de las especies de HMA's (*Glomus hoi*, *Rhizoglomus* sp, *Diversispora aurantia* y *Acaulospora* sp.) junto con la enmienda orgánica (compost) en la absorción de Cd y el desarrollo de las partes vegetativas del cacao. Para llevar a cabo el estudio, se recolectaron HMA de parcelas de los productores de cacao de la provincia de Lamas y se multiplicaron en invernaderos de la Universidad Católica Sedes Sapientiae utilizando cultivos hospederos en macetas, posteriormente, se prepararon los sustratos agregando una solución preparada a partir de sal metálica de cloruro de cadmio (1 g L^{-1}) y el medio de enraizamiento de acuerdo con el diseño establecido.

Para tal fin, las semillas de cacao criollo extraídas de mazorcas recolectadas de plantas matrices en la provincia de Lamas fueron repicadas en maceteros, se les añadió esporas de HMA pertenecientes al consorcio Lamas. En este sentido, también se evaluó el desarrollo vegetativo del cacao durante 4 meses de manera continua. Las evaluaciones de colonización de micorrizas se llevaron a cabo de acuerdo con la metodología desarrollada por Brundrett *et al.* (1984). La longitud de micelio midió utilizando un microscopio a 4,5 x y las intersecciones entre Hifa-Línea se cuantificaron con un contómetro. Las concentraciones de cadmio en el suelo se analizaron utilizando el Método 3050B de la U.S. Environmental Protection Agency (EPA), además, las cantidades de Cd en tallo y raíces empleando el método de Digestión: HNO₃/espectro Absorción Atómica.

OBJETIVOS

Objetivo general

Determinar el efecto de los hongos micorrizos arbusculares (HMA) y el compost en la absorción de cadmio y crecimiento vegetal del cacao criollo.

Objetivos específicos

- Evaluar el efecto de los HMA y el compost en la absorción de cadmio en suelos y raíces de cacao en vivero en la Región San Martín.
- Evaluar el efecto de los HMA y el compost en el crecimiento vegetal de cacao en vivero en la Región San Martín.
- Evaluar el efecto de la colonización extra radicular de HMA de las plantas de cacao en los suelos contaminados con cadmio en vivero de la Región San Martín.

CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO

1.1. Antecedentes

Antecedentes internacionales

En su investigación, Correa *et al.* (2021) examinaron cómo las propiedades del suelo alteran la absorción de Cd y el desarrollo de plántulas de cacao en un entorno de invernadero en Colombia. En su estudio, emplearon suelos del tipo andisol del horizonte A que lo tamizaron en mallas menores a 2 cm. Posteriormente aplicaron a los suelos, soluciones de Cd a partir de sulfato de cadmio hidratado en las siguientes concentraciones: 0, 2, 5, 10 y 20 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$. Implementaron un diseño experimental completamente aleatorizado con diseño factorial de $4 \times 5 \times 4$ y tres repeticiones. Los respectivos niveles de los factores fueron: cuatro niveles para suelo correspondientes a S1, S2, S3 y S4; cinco niveles de Cd total correspondientes a 0, 2, 5, 10 y 20 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$; y cuatro niveles para cultivar correspondientes a Caucasia-39, IMC-67, FSV-41 y CCN-51. Luego de 120 días después de la siembra, recolectaron las plantas y realizaron los análisis de Cd y crecimiento vegetativo. Los análisis estadísticos fueron realizados empleando modelos de regresión con el uso de software R Studio Team, versión 1,0,143. Se han encontrado varias relaciones entre las propiedades físico – químicas del suelo y el cadmio disponible, como la densidad aparente y la real, el contenido de hierro, arena, magnesio, potasio, sodio y cobre. Además, las correlaciones fueron moderadas a fuertes entre el potasio ($r^2 = -0,56$) y densidad real ($r^2 = 0,42$) con respecto al cadmio foliar. Asimismo, corroboraron un efecto diferencial sobre el crecimiento del cacao en variables como la biomasa en concentraciones de cadmio de 5 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ en suelos. El estudio no encontró diferencias estadísticamente significativas entre las variedades cultivadas en términos de absorción de Cd o el desarrollo de las plantas. Como propuesta para estimar el contenido de Cd foliar presentaron un ajuste lineal múltiple con coeficiente de determinación $r^2 = 0,878$. Finalmente, encontraron que ciertas propiedades del suelo, como el bajo pH, la alta densidad aparente y real y los altos niveles de arcilla, aluminio, hierro y zinc, están asociados con una

mayor disponibilidad de cadmio, condiciones que ejercen un efecto negativo sobre el crecimiento de las plantas.

Zhang et al. (2019) llevaron a cabo una investigación en la ciudad de Xinghua, China, para evaluar los efectos de los HMA y el biocarbón en el desarrollo y la absorción de metales pesados, específicamente en la “alfalfa” (*Medicago sativa* L.). Para ello, utilizaron una mezcla de arena de río y suelo en cantidades de 1: 2. Para lo cual se realizó un diseño factorial $2 \times 2 \times 2$, con incorporación de cadmio, inoculación de HMA's y enmienda de biocarbón, además, se dispuso de un DCA con 4 réplicas. El estudio incluyó dos cantidades de Cd (0 y 20 mg.kg⁻¹), dos tratamientos con biocarbón (0 y 3 %, p: p) y dos más con HMA (inoculación de HMA, no micorrízicos control,). Además, se probaron ocho conjugaciones experimentales, a saber: sin HMA, HMA, biocarbon (BC), HMA + BC, Cd, HAM + Cd, BC + Cd y HMA + BC + Cd. Los cálculos estadísticos se realizaron con SPSS 13.0, con un ANOVA para observar los resultados de la inoculación de HMA, de la suplementación con biocarbón y el cadmio; así como pruebas de Duncan en la comparación post hoc. Los resultados mostraron que la inoculación de HMA suplementada con biocarbón tuvo las concentraciones mínimas de Cd en los brotes de la alfalfa, pero los niveles de N y P en los tejidos vegetales se dio en el grupo que se agregó cadmio. Los ensayistas concluyeron que la combinación de HMA y biocarbón brindó efectos sinérgicos significativos en la absorción de los nutrientes y la reducción de la presencia de Cd.

En su estudio, Rask *et al.* (2019) investigaron el papel de las esporas de micorrizas arbusculares (MA) en la movilidad del cadmio (Cd) y su impacto en la colonización de las plantas por las MA. Además, examinaron cómo diferentes especies de vegetales colonizados por MA influyeron en la absorción y la toxicidad del cadmio en las plantas. La investigación se realizó en un invernadero en Dinamarca, utilizando con seis especies de plantas cultivadas en macetas (*Hordeum vulgare* L. var. Evergreen, *Linum usitatissimum* L., *Sorghum bicolor* L., *Matricaria recutita* L., *Sinapis alba* L. y *Dianthus deltoides* L. var. Erectus) y siete concentraciones de Cd (0,35, 1,35, 2,85, 6,65, 16,15, 40,15 y 100,35 mg.kg⁻¹). El diseño del experimento incluyó una planta con alta colonización micorrízica, *Hordeum vulgare* L. var. Evergreen (con una colonización superior al 50 %), dos plantas (*Linum usitatissimum* L. y *Sorghum bicolor* L.) ambas de moderada con colonización micorrízica (20 – 50 % de colonización), una con baja colonización (*Matricaria recutita* L con colonización menor del

25 %), y dos plantas que sin actividad micorrízica (*Sinapis alba* L. y *Dianthus deltoides* L. var. Erectus ambas sin colonización). Las plantas se cosecharon de forma destructiva una vez transcurrido dos meses y las raíces de cada maceta se lavó con agua destilada, se cortó en trozos de 1 cm y se dividieron en dos submuestras: la primera para medir el Cd y la segunda para el análisis de colonización micorrízica. Seguidamente, las raíces y los brotes se secaron a 105 °C por un lapso de 24 horas, a continuación, se realizó la digestión por microondas con el equipo MARS 6 de CEM Corporation, para lo cual se añadió 10 ml de ácido nítrico al 32,5 %, con la finalidad de medir la concentración de Cd en las muestras mediante espectrofotometría de absorción atómica con el equipo PinAAcle™ 900T de Perkin Elmer. El material radicular se trató con hidróxido de potasio al 10 % y se tiñeron con azul de tripano al 0,05 % según el método modificado de Phillips y Hayman (1970). Tanto el análisis de correlación y el de regresión lineal se realizaron con el software de graficación SigmaPlot v.13.0, y los análisis de varianza (ANOVA) con el software de integración de datos SAS Enterprise Guide 6,1. Los resultados mostraron que la asociación con MA reduce la translocación de cadmio a los brotes, principalmente en plantas con tasas de colonización de HMA más elevadas. Ellos concluyeron que la interacción entre las especies de plantas y la colonización de HMA promueve significativamente la absorción de cadmio en las plantas resultado importante considerar las HMA al cultivar plantas en áreas donde este metal pesado está presente.

En su estudio, Pérez *et al.* (2019) investigaron el potencial de las micorrizas en la absorción de Cd en plantas de cacao. El propósito principal de la investigación fue evaluar la capacidad de las micorrizas arbusculares (HMA) para inmovilizar el Cd en un cultivar de cacao (IMC 67), con el objetivo de determinar su habilidad para retener el Cd. El ensayo experimental se llevó a cabo en Rionegro, Colombia, y la metodología incluyó un grupo de control y tres tratamientos micorrízicos diferentes: *Glomus macrocarpum*, *Rhizoglomus intraradices* y HMA nativos. Se emplearon varias concentraciones de cadmio (0, 6, 12, 18 y 24 ppm). Los autores registraron datos morfológicos y cuantificaron los niveles de cadmio en todas las partes vegetativas de las plantas (raíz y aérea). Se llevaron a cabo muestreos destructivos a los 30, 60, 90 y 120 días después de la siembra, siendo el muestreo de los 30 días considerado como el punto de referencia (sin la incorporación de dosis de cadmio). Se evaluó la colonización micorrízica en el primer y último muestreo, y se midió el contenido de cadmio en las partes vegetativas de las plantas. El diseño experimental fue aleatorio y empleó la

prueba de Tukey para analizar las diferencias significativas, con un nivel de significancia de 0,05 en todas las pruebas realizadas. Los análisis se llevaron a cabo utilizando el software STATISTIX 9.0 ®. Los resultados revelaron que las plántulas de *T. cacao* transportaban el cadmio con facilidad a las partes vegetativas, como los tallos, hojas y raíces. Por otro lado, las plantas inoculadas con HMA – nativos presentaron una significativa disminución de la acumulación de Cd en todas las partes vegetativas analizadas. Los autores concluyeron que hubo evidencia de translocación de Cd en el cacao, pero la presencia de simbiontes HMA permitió un desplazamiento hacia la parte aérea, por lo tanto, consideraron que las micorrizas simbiontes reducen el estrés causado por metales tóxicos.

En su estudio, Qing *et al.* (2018) investigaron las implicancias de la simbiosis de los hongos micorrízicos arbusculares (HMA) en el crecimiento de las plántulas de maíz, así como también la absorción de metales pesados y nutrientes en ellas mismas. Este estudio se centró en las propiedades que brinda el *Claroideoglobus etunicatum* al incorporarla en la biomasa, así como también se evaluó su implicancia en la absorción de nutrientes, de metales y la translocación en el maíz sembrado en suelos enriquecidos con lantano (La) y cadmio (Cd). Esta experiencia se realizó en China y se diseñó como un bloque aleatorizado 2 x 2 x 2, con dos tratamientos con Cd (0 y 5 mg.kg⁻¹ de suelo), dos tratamientos de La (0 y 100 mg.kg⁻¹ de suelo), la primera que contenía una inoculación con micorrizas y la segunda sin inoculación en calidad de testigo (con y sin *C. etunicatum*). Cada tratamiento se replicó en seis ocasiones, lo que resultó en un total de 48 macetas dispuestas de manera aleatoria. Los valores numéricos obtenidos se sometieron a un análisis de varianza de tres vías (ANOVA) utilizando el software SPSS 17.0. Los datos que seguían una distribución normal se sometieron a la Prueba de Duncan, con un nivel de significancia de $P < 0,05$, mientras que los datos que no tenían una distribución normal (colonización micorrízica) se transformaron utilizando el arcoseno y se analizaron mediante Kruskal-Wallis. Los resultados revelaron que la tasa de inoculación de *C. etunicatum* en el maíz varió entre 22,0 y 34,0 %. Sin embargo, en comparación con el grupo testigo, las aplicaciones individuales y combinadas de La (100 ppm) y Cd (5 ppm) redujeron significativamente la colonización de HMA en un 22,0 %, 35,0 % y 28,6 %, respectivamente. La inoculación de HMA incrementó la biomasa del maíz en un 26,2 % en cotejo con el testigo. Según los autores, estos hallazgos contribuyen a una mejor comprensión de cómo los HMA pueden contribuir a la fitorremediación de

suelos, principalmente al afectar la biodisponibilidad, la fitotoxicidad y la coexistencia de elementos metálicos en los ecosistemas.

Song *et al.* (2015) investigaron la biodisponibilidad de cadmio (Cd) para el raigrás en China utilizando la técnica de Gradiente Difusivo en Película Delgada (DGT), y evaluaron cómo las propiedades del suelo influían en esta biodisponibilidad. En la metodología utilizaron 18 suelos contaminados con Cd, que se secaron al aire y luego fueron tamizados a 2 mm para homogenizar el suelo. Se evaluó el pH del suelo, el cual se midió en una mezcla 1: 2.5 (peso/volumen) con agua desionizada utilizando un medidor de pH (Delta 320, Mettler, Zúrich, Suiza), además, se determinó la materia orgánica (MO) mediante la digestión con dicromato de potasio y la capacidad de intercambio catiónico (CEC) utilizando NH_4OAc / HOAc para extraer el Cd a pH 7.0. Con el uso de un espectrómetro de absorción atómica se midió la concentración total de Cd en los suelos. Se utilizaron semillas esterilizadas en la superficie con hipoclorito de sodio (NaClO) con una concentración de 5 g.kg^{-1} , cinco semillas se sembraron en cada maceta que contenía 1 kg (equivalente seco peso) de cada suelo. Las plántulas germinadas fueron raleadas a 3 por maceta después de 15 días de establecidas. Las plantas se cultivaron en condiciones controladas con una temperatura de $21 \text{ }^\circ\text{C}$ durante el día y $16 \text{ }^\circ\text{C}$ durante la noche, y una humedad relativa del 60 al 70 %. Después de 60 días de crecimiento, los brotes y las raíces se cosecharon y se analizaron mediante pruebas estadísticas descriptivas, análisis de significancia y cálculos de regresión utilizando el software SPSS versión 16.0. Los resultados indicaron que la transferencia de Cd al raigrás fue influenciada negativamente la acidez del suelo y positivamente por la materia orgánica (MO). Los análisis estadísticos multivariados mostraron que los coeficientes de correlación ajustados para las parcelas que involucran el Cd total del suelo, el Cd del agua de los poros y el Cd extraíble con Na_2EDTA y AC mejoraron significativamente al considerar las influencias de las propiedades del suelo, lo que sugirió que estos métodos dependían del pH y de la MO. En cuanto a la CEC, los autores concluyeron que los principales componentes del suelo que son capaces de influir en la biodisponibilidad tuvieron el menor impacto en la tecnología DGT.

Antecedentes nacionales

Vallejos-Torres *et al.* (2022) llevaron a cabo un ensayo experimental que examinó cómo los hongos micorrízicos arbusculares (HMA) contribuyen en la absorción de cadmio (Cd) y el crecimiento de las plantas de *T. cacao* en un ambiente controlado (vivero) en la amazonia peruana. Para lo cual realizaron la inoculación de semillas germinadas de cacao con varias especies de HMA, utilizando una proporción de 1500 esporas en sustratos dispuestos en maceteros de 3 kg, que contenían dos concentraciones de Cd (CdCl_2): 0 y 5 mg.kg^{-1} . Evaluaron diversos indicadores, como la altura de las plantas, la colonización y el micelio de HMA, así como la concentración de Cd en el suelo y en los tallos de las plántulas de cacao. Para analizar los resultados, emplearon un DCA con un arreglo bifactorial que comprendía ocho tratamientos. Además, llevó a cabo el análisis de varianza para un nivel de significancia de $p < 0,05$ y aplicaron la prueba de Tukey. Los hallazgos obtenidos señalaron que el consorcio de HMA recolectado en Mariscal Cáceres mejoró tanto la altura de las plantas como la expansión foliar. En contraste, el consorcio de Lamas promovió un incremento de cadmio tanto en los tallos del cacao como en el suelo donde se estableció el cultivo. En términos de colonización micorrízica, los consorcios de Lamas y Rioja alcanzaron los valores más altos, con un 89,33 % y un 84,09 % respectivamente, cuando no se añadió cadmio al suelo, además, mostraron una reducción de cadmio en el suelo en un 8,66 % y el 6,30 %, respectivamente. También se observó una disminución en el contenido de cadmio en el sistema aéreo (tallos), con valores de reducción del 18,90 % para el consorcio de Lamas y del 17,43 % para el consorcio Mariscal Cáceres. En resumen, los autores concluyeron que las especies de HMA presentes en las raíces de las plantaciones de cacao podrían incorporarse en programas de biorremediación para retener el cadmio y promover el desarrollo de las plantas.

Rosales-Huamaní *et al.* (2021) investigaron la concentración de cadmio y plomo en sembradíos de *T. cacao* en Junín, Perú, el estudio se llevó a cabo en suelos arcillosos y ligeramente ácido localizados en la zona de Satipo. La metodología consistió en recolectar muestras de suelo agrícola, esta muestra (1 kg) fue analizada en el laboratorio de análisis de la FIGMM-UNI, después de secarla, triturarla y tamizarla para luego ser almacenadas a 22 °C. El contenido de los elementos se determinó utilizando el método de la Agencia de Protección Ambiental (EPA - 3050B). Las muestras en solución obtenidas tras el proceso de

digestión se analizaron en un espectrofotómetro de absorción atómica (Scientific Equipment, modelo XplorAA). La estadística realizada con los datos de las muestras incluyó la prueba de t-Student y el análisis de correlación de Pearson para las concentraciones de Cd y Pb. Los resultados así obtenidos, mostraron que el contenido medio del cadmio fue de $1,25 \text{ mg.kg}^{-1}$ por debajo del límite permisibles del MINAM, que es de $1,4 \text{ mg.kg}^{-1}$. En cuanto al plomo, se determinó que el contenido promedio de $19,44 \text{ mg.kg}^{-1}$, el cual también está por debajo de la norma del MINAM. Los autores concluyeron que el mapa geoquímico muestra las mejores zonas para cultivar cacao, ya que la concentración de cadmio y plomo están por debajo de los límites permisibles.

Huaraca-Fernandez *et al.* (2020) efectuaron una revisión sobre el uso de abonos orgánicos para retener el cadmio (Cd) en tierras agrícolas, el estudio se llevó en Lima, Perú. Los autores evaluaron cuatro informes científicos que se centraban en el efecto del compost como abono orgánico en la inmovilización de cadmio (Cd), así pues, tres artículos científicos evaluaron el efecto del estiércol y un artículo evaluó el efecto del vermicompost en la reducción de Cd. Los resultados indicaron que la enmienda orgánica, restos de animales, residuos de casa, fertilizantes microbianos y rastrojos de cosecha desempeñan un rol importante para corrección de suelos contaminados con Cd. También llegaron a la conclusión que las “enmiendas orgánicas” cuentan con el potencial para disminuir la concentración de cadmio en las plantas.

Florida *et al.* (2019) estimaron el efecto de la enmienda orgánica y química en los microorganismos y cadmio (Cd) en cacao, más precisamente el impacto del compost y NPK en varios grupos de microorganismos presentes en suelos y en la concentración del Cd en las almendras de cacao (Clon CCN), esta investigación fue realizada en Ucayali, Perú. Para lo cual emplearon un diseño de bloque al azar para cuatro tratamientos: grupo de control, el Tratamiento 2 utilizó compost a una dosis de 3000 kg ha^{-1} , el Tratamiento 3 empleó NPK en una proporción de 84-35-161 y el Tratamiento 4 fue la combinación de compost para una concentración de 1500 kg. ha^{-1} y NPK (42-18-80), cada tratamiento se replicó cuatro veces. Se realizó pruebas de normalidad, como Shapiro-Wilk y Shapiro-Francia, una vez que fue conocida la normalidad de los datos se procedió con el análisis de varianza a efectos de examinar la correlación entre el tratamiento y las variables evaluadas. El software utilizado

fueron el IBM SPSS 25 y el Stata 15. La concentración de Cd se determinó mediante el uso de EDTA 0,05 M y los granos de cacao se evaluaron utilizando DANP en una proporción de 4:1. El recuento de microorganismos aerobios se basó en más de 100 UFC/g, mientras que los actinomicetos, hongos y nitrificantes se midieron también en más de 100 UFC/g, la media de concentración de cadmio fue de 0,21 $\mu\text{g. g}^{-1}$ en general y 0,37 $\mu\text{g. g}^{-1}$ en los granos de cacao. Los resultados mostraron que no se encontró diferencias significativas ($p < 0,05$) entre los tratamientos ni en la formación de los grupos microbianos, además, se observó que el compost tuvo un impacto significativo en la disminución del contenido de Cd en los granos de cacao, siendo el Tratamiento 2 el que mostró mejores respuestas en cuanto a la presencia de grupos de microorganismos.

1.2. Bases teóricas especializadas

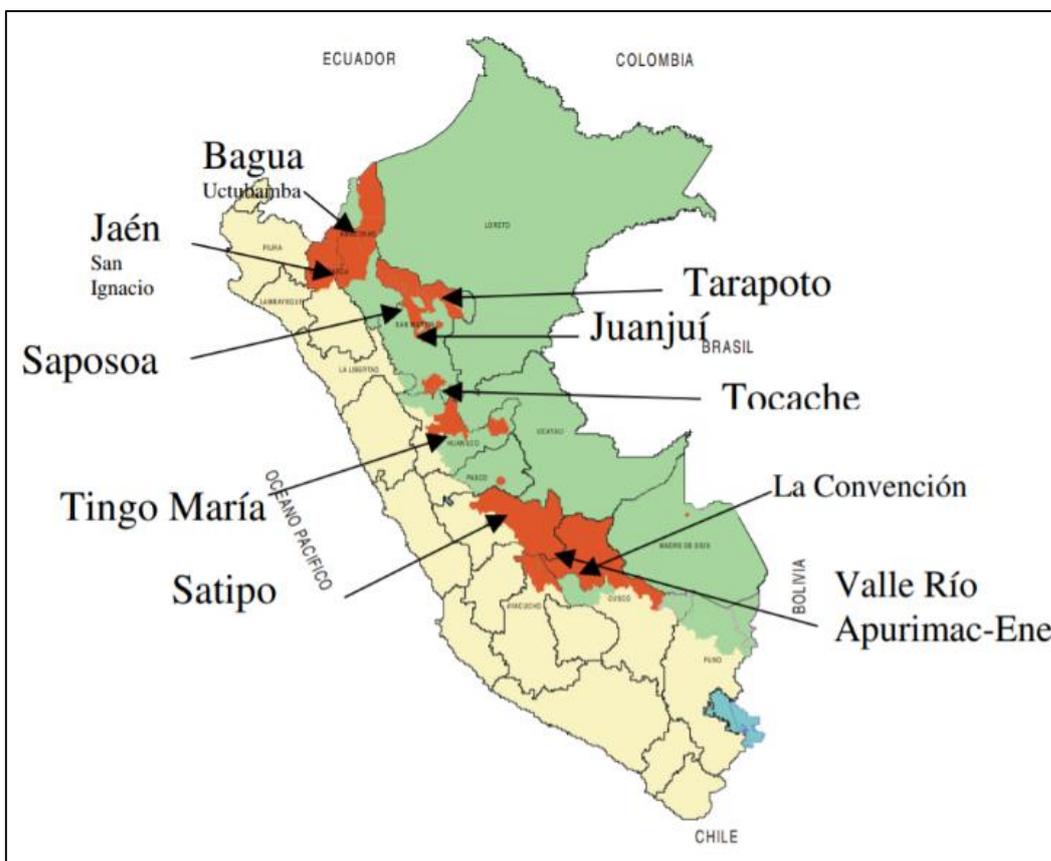
1.2.1. Origen del cacao

El origen del cacao se sitúa en las regiones cercanas a los ríos Caquetá, Putumayo y Napo en el Perú (García, 2000). La expansión de las plantas de cacao se hizo de dos maneras, la primera, cubriendo el sur de México y Centroamérica, la segunda por el oeste, incluyendo Colombia, Ecuador y Perú (Motamayor *et al.*, 2002). Históricamente, el cacao ha sido utilizado por las culturas maya y azteca con propósitos religiosos, medicinales y como alimento, como se describe en el informe del Ministerio de Agricultura y Riego (MINAGRI, 2016).

La presencia del cultivo de cacao en el Perú abarca diversas regiones principalmente cercanas a la Amazonía peruana, como se detalla en la Figura 1. López *et al.* (2020) señalan que es posible encontrar *T. cacao* en el Huallaga Central, Alto Marañón, Río Apurímac, La Convención y Bagua. En San Martín, el cacao se cultiva especialmente en Tocache, Juanjui, Lamas, San José de Sisa y Moyobamba. El cacao es un producto de gran valor comercial para el Perú, al igual que todos sus derivados, como el chocolate y la cocoa (Barrezueta-Unda *et al.*, 2017).

Figura 1

Principales zonas de productoras de cacao en el Perú



Nota. Mapa de ubicación de las zonas de producción de cacao más importantes en el Perú (en rojo); siendo estas, zona del Río Apurímac-Ene (VRAE), la Convención (Cusco), (Ayacucho, Cusco y Junín) y zonas del Huallaga (Huánuco y San Martín); el Valle de Tambo, en el Departamento de Junín, y el Marañón (Amazonas y Cajamarca). [MINAGRI], 2003.

1.2.2. Características agronómicas del cacao

El cultivo del “cacao” *Theobroma cacao* L. prospera muy bien desde 0 hasta los 1000 m s.n.m. (Cuatrecasas, 1964); esta planta llega a alcanzar entre 5 a 8 metros. Presenta hojas lanceoladas, con flores pequeñas, ubicadas en tejidos maduros de la planta y ramas. El fruto se denomina generalmente mazorca. El cacao era considerado por los pobladores nativos americanos como "alimento de los dioses". Dependiendo de los clones de cacao es posible encontrar una variación en el número de granos de color violácea y blanquecina adherida a una pulpa (Ganoza *et al.*, 2012). El área foliar es indispensable para la fotosíntesis que realiza la planta; esto a su vez tiene su efecto en el crecimiento, desarrollo, agronómico, captura de los rayos del sol, uso razonable del recurso hídrico y nutrición mineral (Rodríguez *et al.*, 2016).

1.2.3. Efectos del cadmio en plantas

El cadmio es el metal pesado que más interés de estudio tiene para con el cacao debido a su presencia en las partes vegetativa y a su alta toxicidad, lo cual está asociado a efectos negativos para la salud humana. Thévenod y Lee (2013) resaltan que el cadmio tiene una notable capacidad de movilidad en las cadenas alimentarias. En plantas del cacao, el Cd se presenta en el suelo como resultado de diversas enmiendas, como lodos de depuradora y fertilizantes fosfatados, así como también en los residuos de madera quemada, que en muchos casos son añadidas por los agricultores. Estas sustancias pueden terminar en los cultivos alimentarios, como señala Li *et al.* (2016). Cuando los seres humanos ingieren productos contaminados, las concentraciones de cadmio pueden afectar los pulmones, el hígado, los riñones, así como los huesos (provocando una reducción en la densidad ósea) y la placenta. Esto ha sido documentado por Hamid *et al.* (2019) y Alfvén *et al.* (2000). En resumen, la contaminación por cadmio constituye parte de la problemática de los suelos agrícolas y al mismo tiempo que representa un peligro para la salud humana y animal, según Zhong *et al.* (2015). Es crucial tomar medidas para abordar esta problemática y reducir los riesgos asociados a la concentración del cadmio en el medio ambiente y principalmente en los alimentos.

El Cd tiene efectos desfavorables para el desarrollo de las partes vegetativas de las plantas incluso en cantidades relativamente bajas (White y Brown, 2010). La toxicidad en las especies vegetales tiene como consecuencias la interrupción del desarrollo de semillas, la fotosíntesis, la tasa de crecimiento y rendimiento (Rizwan *et al.*, 2017); así como, la asimilación de minerales durante el proceso de absorción radicular (Qaswar *et al.*, 2017). El cadmio se acumula en diversos tejidos vegetales, así pues, el contenido de cadmio en las plantas depende de los clones establecidos dentro de una parcela (Li *et al.*, 2017) y la presencia de diferentes especies de plantas consideradas como malezas (Salt *et al.*, 1990). También es necesario considerar que los suelos tropicales de América del Sur y principalmente los suelos andesíticos de origen volcánico contienen altas concentraciones de cadmio de origen natural (Bansah y Addo 2016; Chávez *et al.*, 2015).

1.2.4. Cadmio en suelos

Yasir *et al.* (2019) afirman que el suelo juega un papel importante como principal reservorio de metales y como impedimento para su ingreso a la cadena alimenticia. No obstante, las actividades como la fundición de metales y la minería han llevado a una gradual transferencia de diversos metales tóxicos del suelo a nuestro entorno, lo que ha resultado en un incremento de la contaminación por metales pesados, como señala Sinha *et al.* (2013).

A través del tiempo, múltiples técnicas fisicoquímicas y biológicas han sido probadas para eliminar los metales pesados del suelo, como indican Yasir *et al.* (2019). En ese sentido, se considera a la inmovilización *in situ* como una estrategia viable para tratar suelos con presencia de metales debido a su fácil implementación y eficacia, como afirman Yang *et al.* (2017). Varios estudiosos han explorado el uso una variedad de enmiendas, como fosfatos, minerales arcillosos, materiales calcáreos y la biorremediación, para inmovilizar el cadmio en suelos contaminados (Cui *et al.*, 2011). La biorremediación implica el uso de microorganismos, como hongos, algas y bacterias, tal como mencionan las investigaciones de Yang *et al.* (2017) y Zeng *et al.* (2017).

La degradación de los suelos agrícolas es un problema ambiental de gran magnitud en varias partes del orbe, como señalan Bateman y Muñoz-Rojas (2020). Actividades del hombre como la deforestación, la agricultura y la actividad industrial pueden provocar un acelerado deterioro del suelo, manifestada en la compactación, la pérdida de productividad y la contaminación, entre otros aspectos negativos, tal como destacan Pereira *et al.* (2018). En términos globales, la concentración de cadmio en suelos naturales varía entre 0,01 y 2,7 mg.kg⁻¹, según lo reportado por McLaughlin *et al.* (1997), en cambio, en suelos sometidos a manejo humano, esta cifra puede llegar hasta 10,5 mg.kg⁻¹, como menciona Chalmers (2001). Dentro de los criterios de los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para suelos agrícolas en el Perú, el Decreto Supremo N° 002 – 2013 – MINAM (2013) estipula que la cantidad de Cd no debe extralimitarse de los 1,4 mg.kg⁻¹. Sin embargo, en nuestra región se ha medido hasta 0,20 mg.kg⁻¹ de cadmio en suelos de cultivo de cacao, según lo reportado por Arévalo-Gardini *et al.* (2016).

La concentración de Cd en el suelo suele estar estrechamente relacionada con la presencia de cadmio en la roca subyacente. Sin embargo, las actividades agrícolas e industriales pueden lixiviar cadmio, excediendo la capacidad del suelo y de los sistemas de raíces de las plantas, lo que en última instancia conduce a la asimilación del metal por las plantas. Estudios anteriores sobre cacaotales en América del Sur han demostrado una clara relación entre la presencia de cadmio en avellanas de cacao y las concentraciones totales de cadmio en el suelo. Además, se ha observado un impacto significativo del pH del suelo en la disponibilidad de cadmio para las plantas, tal como han señalado Argüello *et al.* (2019) y Ramtahal *et al.* (2019).

La biodisponibilidad del Cd en los suelos se ve influenciada por varios componentes, como la concentración total de metales, la materia orgánica, el pH, la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y la presencia de arcilla. Estos aspectos han sido destacados por Alloway (2013) y Kirkham (2006). Específicamente, el pH desempeña un papel crucial en los suelos, ya que regula la solubilidad y movilidad del Cd, lo que a su vez afecta su disponibilidad para las plantas. Un pH más ácido acrecienta la movilidad y solubilidad del cadmio, lo que incrementa el riesgo de absorción por parte de las plantas, como menciona Wang (2006). En las plantaciones de cacao en Sudamérica, es común utilizar sistemas de manejo que involucran el uso de fertilizantes, pesticidas y riego con fertilizantes químicos, según lo señalado por Wickramasuriya y Dunwell (2018).

1.2.5. Simbiosis de micorrizas arbusculares en plantas

La asociación mutualista entre las plantas y los HMA es ampliamente extendida, alcanzando aproximadamente un 80 % de las plantas, especialmente en diversas especies cultivadas (Wipf *et al.*, 2019). Esta simbiosis desempeña un rol crucial en la alimentación de las plantas, permitiéndoles aprovechar de manera más efectiva los componentes del suelo y superar las restricciones abióticas presentes en su entorno (Lenoir *et al.*, 2016). Los HMA colaboran con las plantas para enfrentar diversos desafíos, incluyendo el cambio climático (Torres *et al.*, 2018), sequías (Symanczik *et al.*, 2018) y la presencia de metales pesados contaminantes (Torres *et al.*, 2018).

La asociación micorrícica favorece tanto la absorción de nutrientes de las plantas como la absorción de metales innecesarios (Parmar *et al.*, 2013). Sin embargo, en otros informes científicos se afirma que la colonización micorrízica brinda una ventaja a las plantas, pues los metales pesados son inmovilizados en el micelio o sistema radicular (Hildebrandt *et al.*, 2007). Así pues, hay indicios que los HMA reducen significativamente la concentración de Cd en los brotes de las plantas. (Tan *et al.*, 2015; Zhang *et al.*, 2018).

Además, la colonización micorrízica (CM) de las raíces también puede ser perjudicada por la presencia de metales pesados del suelo (Hildebrandt *et al.*, 2007), en ese sentido, algunas plantas con alta CM muestran un crecimiento favorable en suelos con altos niveles de concentración de metales pesados. A raíz de eso, surge una interrogante, si las diferencias en la tolerancia y la acumulación de cadmio entre especies de cacao depende de la variación natural o en el grado de colonización de HMA específico de cada especie.

1.2.6. Micorrizas arbusculares y reducción de cadmio en el cultivo de cacao

La aplicación con esporas de micorrizas arbusculares a los cultivos de cacao podría reducir el paso del Cd hacia los propágulos vegetativos de la planta. Tal es así que los HMA nativos podrían considerarse como un plan eficiente en la reducción de transporte de Cd hacia la planta de cacao al acumular compuestos xenobióticos en su micelio (Pérez *et al.*, 2019). De acuerdo con diversos estudios, existen muchas tecnologías capaces de remediar este metal tóxico reduciendo el movimiento de suelo a la planta (Wang *et al.*, 2009); así pues, estas metodologías requieren ser validadas y adaptadas a las funciones de la planta y su entorno de crecimiento (Qiu *et al.*, 2011; Wang *et al.*, 2009). Es aquí que los HMA se consideran como una alternativa viable como biorremediadores dentro de la rizorremediación (He *et al.*, 2013; Li *et al.*, 2016), abarcando investigaciones desde la perspectiva genética (variabilidad genética intraespecífica) hasta el lugar de procedencia; es decir, mediante el aislamiento de HMA proveniente de zonas con elevada toxicidad por metales (Fernández y Rodríguez, 2019).

1.2.7. Enmiendas orgánicas y su efecto en el transporte del cadmio hacia las plantas

El compost elaborado a base a residuos orgánicos de diversas fuentes permite a las plantas inmovilizar Cd y otros metales, mejorar la materia orgánica, el pH y la CIC , y permitir que las plantas absorban nutrientes. Asimismo, se reduce el contenido de carbono del suelo, mejorando así el desarrollo vegetativo y estacional de las plantas, la formación de complejos, el intercambio iónico y la precipitación (Huaraca-Fernandez *et al.*, 2020).

En suelos con depósitos de Cd, es útil y fundamental emplear aditivos orgánicos o compost para inmovilizar el Cd a través de la “estabilización *in situ*” la cual implica retener metales pesados por medio de diferentes reacciones bioquímicas, obteniendo así un modelo eficaz y económico sostenible para el ambiente (Hu *et al.*, 2016; Khan *et al.*, 2017). El compost, de manera natural secuestra el cadmio en el suelo por agentes quelantes (Tajudin *et al.*, 2016).

Prácticamente la totalidad de los fertilizantes orgánicos, como el compost y el humus de lombriz, cuentan con la capacidad para reducir la presencia del Cd para las plantas, utilizando mecanismos como la precipitación, la adsorción y la formación de quelatos (Shaheen *et al.*, 2014). Estos fertilizantes también favorecen la asimilación de nutrientes por parte de las plantas (Huaraca-Fernández *et al.*, 2020). Una característica destacada de estas enmiendas es su contenido de taninos, celulosa, lignina, y carbonatos, lo que mejora la capacidad natural del suelo para inmovilizar metales pesados (Sebastian y Prasad, 2013).

Enmiendas líquidas orgánicas (biol) asociadas con carbón líquido han permitido el 44 % de disminución de Cd en las hojas de cacao y 63 % en almendras (Zavala-Solorzano *et al.*, 2022). Sin embargo, asociaciones de nutri abonaza con el compost permitió reducir el 54 % de Cd disponible; pero, en la asociación de nutria bonaza con el humus de lombriz registraron un 73 % de disminución en la almendra de cacao (Huaraca Fernández y Pérez Sosa, 2019).

1.2.8. Descomposición del compost

El compost es el resultado de la descomposición de materiales vegetales, estiércol y microorganismos, generando residuos orgánicos utilizados como fertilizantes para diferentes cultivos agrícolas y forestales (Sarkar *et al.*, 2016). Durante este proceso de descomposición, participan microorganismos eficientes, tanto naturales como aquellos desarrollados en ambientes montañosos, en entorno aeróbico (Mahmud *et al.*, 2015). Esto da lugar a enmiendas orgánicas o fertilizantes beneficiosos para el desarrollo de las plantas. Además, se produce biogás en forma de metano durante la descomposición (Sarkar *et al.*, 2016). Los microorganismos transforman los residuos en compuestos estables (Sánchez *et al.*, 2017) y fácilmente aprovechables, consumiendo O₂ y liberando calor, H₂O y CO₂ en el proceso (Mahmud *et al.*, 2015).

1.2.9. Características del compost

Generalmente la preparación del compost requiere de muchos insumos, tal es el caso de residuos de cosecha, restos de leguminosas, melaza, estiércoles de animales, básicamente de gallina que es lo más usual, pero puede emplearse otros como estiércol de cuy, ovinos, ganado, etc. Sin embargo, existen microorganismos que requieren incluirse para acelerar la descomposición, estos se pueden obtener comercialmente o de colectas realizadas en bosques o montaña. Su finalidad es aportar nitrógeno, el cual aporta cambios a la fertilidad del suelo, así como también hormonas vegetales (Kumar y Gopal, 2015). El empleo de estiércol de gallina es lo más empleado ya que con facilidad puede encontrarse en las granjas; esto sumado a los inmensos desechos se traduce en la generación de tecnologías limpias ambientalmente sostenibles (Bolan *et al.*, 2010). Es así como la enmienda orgánica se convierte en un potencial para el cultivo de plantas por su sostenibilidad y producción orgánica (Alvarez-Vera *et al.*, 2018).

CAPÍTULO II. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Diseño de la investigación

El proceso experimental desarrollado se basó en un experimento en el que se comparó el impacto de los HMA y el compost tanto en la absorción y movilidad del Cd en el suelo, así como también en las partes vegetativas de plántulas de cacao de 4 meses de edad. De acuerdo con las palabras de Baena (2017), los diseños experimentales implican la operación de variables en situaciones controladas o con estímulos, con el propósito de obtener resultados finales provenientes del experimento adaptado al ensayo. Además, este estudio se enmarca en un enfoque aplicado, pues se emplearon principios para la validación del ensayo en un vivero con la aplicación del método científico, con el fin de solucionar dificultades de manera inmediata (Cortés y Iglesias, 2004). Los formatos empleados para recolectar los datos se encuentran adjuntos en el apéndice.

2.2. Lugar y fecha

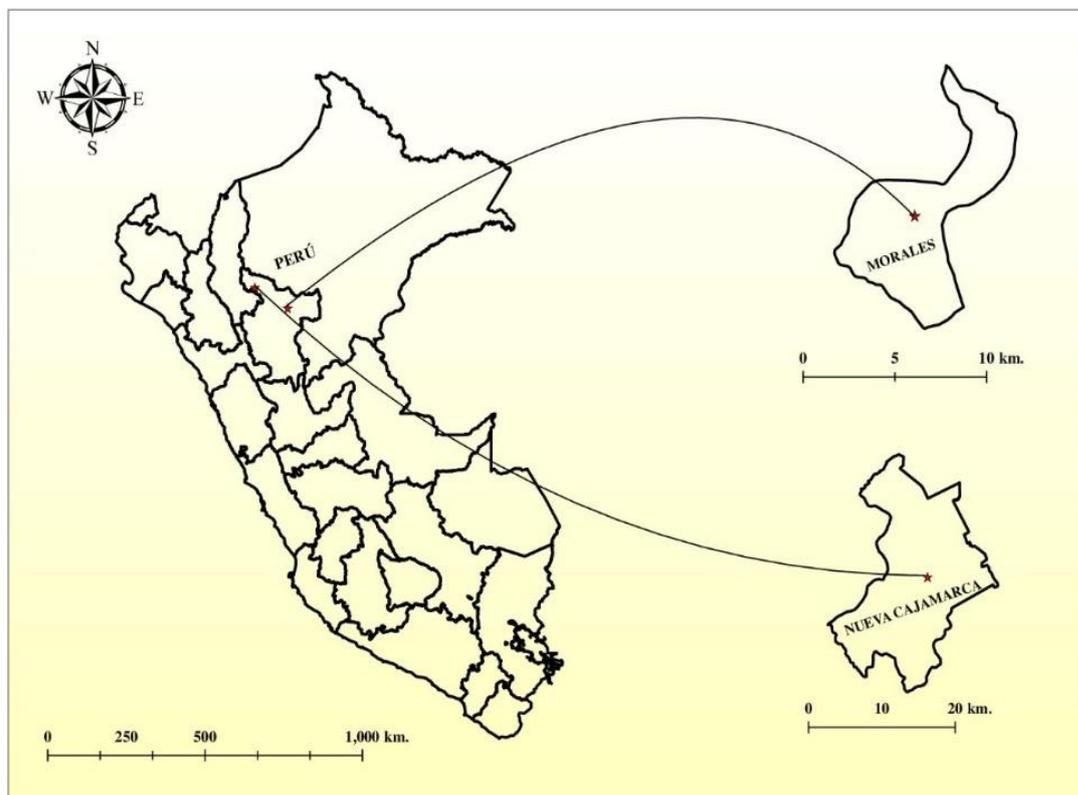
Este trabajo de investigación se realizó de manera activa tanto en el laboratorio del campus de la Universidad Católica Sedes Sapientiae (UCSS) – Sede Rioja, ubicado en el distrito de Nueva Cajamarca, en donde se extrajeron los HMA, para después incorporarlos en los sustratos de los maceteros que fueron instalados en el invernadero de la Universidad Nacional de San Martín, ubicados distrito de Morales de la Región San Martín (Figura 2). Además, esta parte experimental se llevó a cabo entre los meses de julio y diciembre de 2021.

Nueva Cajamarca se encuentra a una elevación de 875 ms.n.m., tiene un clima templado y temperatura mensual media de 24 °C. Por otro lado, el distrito de Morales está situado a una altitud más baja de 230 ms.n.m., con una temperatura promedio mensual ligeramente más alta de 24,6 °C. Además, la ubicación registra una precipitación mensual media de 119 mm

una alta humedad relativa por encima del 80%

.Figura 2

Mapa de ubicación del estudio



Nota. Ubicación de los distritos de Morales y Nueva Cajamarca en las provincias de San Martín y Rioja. Elaborado con el programa ArcGis 10.4.1.

2.3. Descripción del experimento

2.3.1. Caracterización fisicoquímica del compost

Para el estudio se elaboró el compost en el vivero de la UCSS – filial Rioja, en una compostera de 4 m x 2 m x 1 m y una pendiente de 3 %, utilizando rastrojos de cosecha de cacao (previamente picados).- Para brindarle calidad y optimizar el proceso de descomposición, al compost se añadió microorganismos eficientes (obtenidos mediante una solución de 3 litros de líquido ruminal, 2 litros de leche, 1 litro de melaza y 100 g de levadura). El proceso de descomposición fue anaeróbico obteniéndolo luego de 40 días.

Para evaluar las características del compost se tomó 1 kg de muestra y fue llevado al Laboratorio de Cultivo de Tejidos Vegetales de la UNSM para determinar su calidad mediante análisis físico y químico. - Siendo la textura el parámetro físico y los parámetros químicos fueron: pH, MO, N, P, K y Cd. Cabe mencionar que el método utilizado para la determinación del Cd fue la espectrometría de absorción atómica (EPA 3050 B).

2.3.2. Preparación y desinfección del sustrato

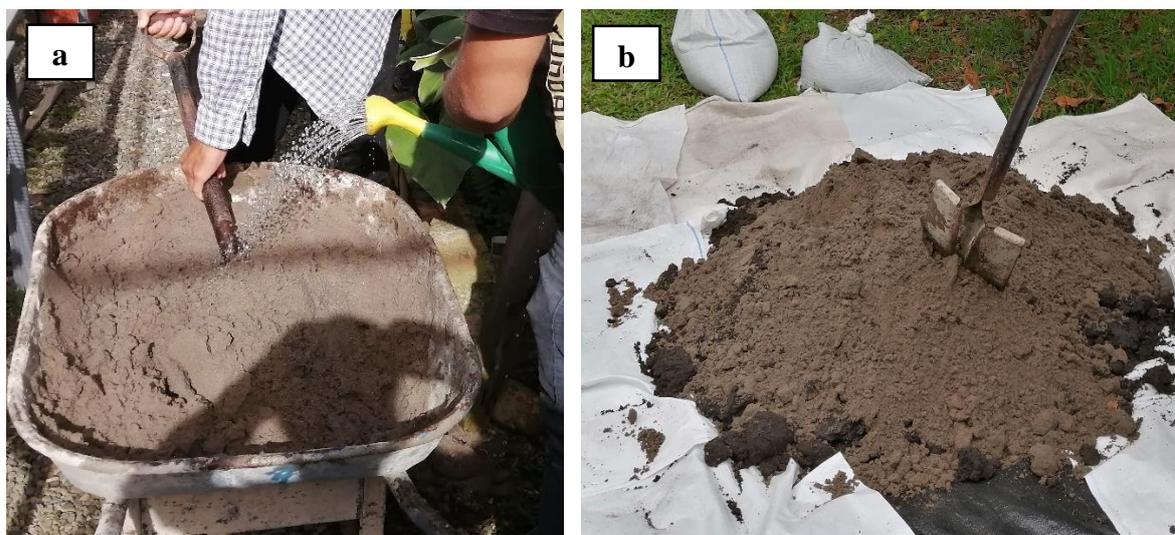
La arena fue desinfectada con abundante agua e hipoclorito de sodio al 2,5 % y expuesta al ambiente por un periodo de 6 horas con la finalidad de lograr la evaporación del desinfectante; posteriormente, fue esterilizada en autoclave a 121 °C x 15 psi de presión durante un lapso de 2 horas, para luego, dejarla enfriar (Figura 3a). La tierra agrícola fue recolectada de 2 a 3 cm de profundidad de parcelas cacaotero, en la misma zona donde se obtuvo las mazorcas de cacao, en bolsas de plástico debidamente identificadas. Por lo tanto, el sustrato se preparó mezclando tierra agrícola y arena de río en 3:1.5 (v/v) respectivamente; según la metodología propuesta por Vallejos-Torres *et al.* (2022). Es preciso enfatizar que los materiales y herramientas utilizados durante la colecta y mezcla tanto del sustrato como la incorporación del compost de acuerdo con el tratamiento (Figura 3b) fueron debidamente desinfectadas con alcohol.

2.3.3. Caracterización fisicoquímica del suelo por tratamiento

El estudio incluyó la realización de ocho análisis fisicoquímicos utilizando muestras de suelo recolectadas al final de la investigación (ver Apéndice 2). Para recolectar las muestras de suelo, se utilizó una paleta mediana en forma de "V", y luego se mezcló 1 kg de suelo en una bolsa plástica transparente etiquetada con el nombre del tratamiento muestreado. El muestreo se realizó en cada macetero hasta obtener una muestra homogénea para cada tratamiento, siguiendo las pautas establecidas por el MINAM (2014).

Figura 3

Preparación del medio de crecimiento para el estudio



Nota. (A), Lavado y esterilización de arena y (B) sustrato de enraizamiento (tierra agrícola, arena y compost).

2.3.4. Aplicación de cloruro de cadmio y remoción de sustratos contaminados

El estudio midió el efecto de dos niveles de concentración de Cd: 0 y 5 mg.kg⁻¹. Se preparó una solución madre del ion altamente tóxico (Cd²⁺) a partir de sal metálica de cloruro de cadmio (CdCl₂), y su concentración se estandarizó a 1 g L⁻¹. Para garantizar que se alcanzaba la concentración necesaria de Cd²⁺ por kilogramo de sustrato de los tratamientos T₅ a T₈. Este procedimiento se realizó con extrema precaución, ya que la toxicidad de los iones Cd²⁺ puede ser increíblemente peligrosa para los organismos vivos y causar una serie de graves problemas de salud. El Cd en forma de cloruro de cadmio (CdCl₂) en solución acuosa (Figura 4A) se combinó con el medio de crecimiento (arena y suelo agrícola colectado en campo), se separaron cuidadosamente alícuotas hasta alcanzar una concentración de 5 mg de Cd²⁺ por kilogramo de sustrato

Para ello, los sustratos fueron pesados en bolsas de polietileno transparente de 12 x 16 pulgadas enrasado a 3 kg/bolsa, posteriormente se incorporó el Cd (Figura 4B). El suelo con Cd se secó a la intemperie, y se realizaron cuatro remociones cada 15 días, en un tiempo total de 2 meses con la finalidad de estabilizar la concentración del cadmio en el sustrato como lo indica Vallejos-Torres *et al.* (2022).

Figura 4

Preparación del cloruro de cadmio y aplicación al medio de crecimiento



Nota. (A), Preparación de una solución 5 mg.kg^{-1} de CdCl_2 y (B), Aplicación de la solución de CdCl_2 a medio de crecimiento (sustrato).

2.3.5. Multiplicación de HMA

Los HMA fueron obtenidos de varios cacaotales de la provincia de Lamas y aislados en un medio de cultivo en el laboratorio de Cultivo de Tejidos Vegetales de la UNSM. Para la masificación micorrízica se emplearon cultivos hospederos como arroz (variedad INIA 507 La Conquista) y maíz (variedad Marginal 28 Tropical) que fueron inoculados con HMA, luego se procedió a remojar en agua para iniciar el proceso de germinación; posteriormente, se depositaron en cajas de madera para continuar sus fases vegetativas. Durante cada período de estudio de 80 días, las plantas se regaron regularmente cada dos días, posteriormente, los siguientes 30 días se sometieron a estrés hídrico para suscitar la multiplicación de los HMA y evaluándose 110 días después. Después de los 110 días se procedió con el análisis de la morfología de los cultivos hospedantes, así como también con el conteo de las esporas y el análisis de colonización micorrízica de los inóculos de micorrizas arbusculares multiplicados, como plantean Del Águila *et al.* (2018).

2.3.6. Inoculación con hongos micorrízicos arbusculares a semillas germinadas

Mazorcas de cacao criollo fueron colectadas en plantas matrices de la provincia de Lamas, llegadas al vivero fueron abiertas y extraídas las semillas uniformes con características físicas sanas; luego se realizó el humedecimiento con agua esterilizada y sembró en arena (Figura 5a) esterilizada en autoclave a $121 \text{ }^\circ\text{C}$ x 15 psi de presión por 2 horas. Transcurridos

7 días se obtuvo semillas germinadas bajo sombra, que presentaron un desarrollo uniforme, a sugerencia de Palencia *et al.* (2009). Finalmente, las plántulas germinadas se repiquetearon en cada macetero con el medio de crecimiento detallado anteriormente, también se les inoculó 1500 esporas de HMA con la finalidad de que éstas colonicen las raíces de cacao (Figura 5b). Las especies de HMA genéticamente identificadas utilizadas en este estudio fueron la *Glomus hoi*, *Rhizoglomus* sp., *Diversispora aurantia*, y *Acaulospora* sp., todas pertenecientes al consorcio Lamas. La técnica de inoculación empleada consistió en la aplicación de esporas, utilizando un inoculante con un peso específico de 50 gramos y que contenía 1500 esporas. Estas esporas fueron añadidas al sistema radicular de la semilla de cacao germinada durante el proceso de repique. Posteriormente, se las regó con agua filtrada hasta alcanzar el nivel de capacidad de campo, tal como señala Vallejos-Torres *et al.* (2022). Este procedimiento permitió llevar a cabo un monitoreo continuo y una evaluación constante en todo el desarrollo vegetativo de las plantas de cacao.

Figura 5

Germinación y repique de semillas de cacao



Nota. (a), Germinación de semillas de cacao en arena estéril y (b), Repique de semillas de cacao en medio de crecimiento e inoculación con HMA.

2.3.7. Evaluación del crecimiento de las plantas

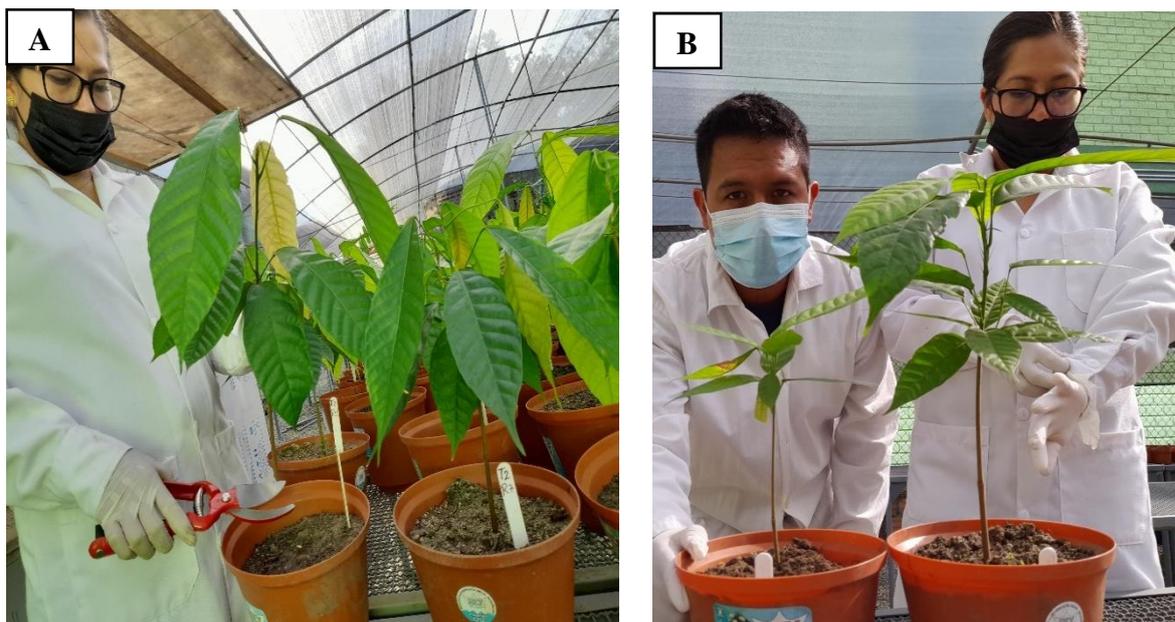
En este proceso se realizó la medición de plantones de cacao por tratamientos, lo cual ha permitido diferenciar el tamaño de los plantones. Se ejecutó transcurrido los 3 meses del repique, utilizando una regla milimétrica.

2.3.8. Proceso de extracción de plantas

Este proceso se llevó a cabo a los 4 meses después del repique, en la cual se extrajo todas las plantas empleadas en tratamiento de sus respectivos sustratos con mucho cuidado con el propósito de no dañar las raíces (Figura 6). La extracción se realizó con una tijera podadora desinfectada con algodón y alcohol, la desinfección además se hizo constantemente durante el todo el proceso. Se procedió a la separación de las plantas en dos secciones distintas: la parte aérea y la parte radicular. Con sumo cuidado, se etiquetaron de manera adecuada, indicando el tratamiento en estudio, la fecha y el lugar correspondiente. Estas muestras fueron preparadas meticulosamente para luego enviarlas al laboratorio, donde se llevarían a cabo los análisis correspondientes (consultar Apéndice 3, 4 y 5).

Figura 6

Preparación de muestras para determinación de cadmio



Nota. (A) obtención de raíces y tallos y (B), Diferencias de plantones.

2.4. Tratamientos

La parte experimental del presente estudio lo conforman los 8 tratamientos con sus 6 repeticiones (Tabla 1) dentro de un arreglo trifactorial: 2A (Consortios de HMA) x 2B (Dosis de abono) x 2C (Dosis de cadmio). Los tratamientos estuvieron constituidos de la siguiente manera:

T1: Sin HMA, Cd y Compost; T2: HMA; T3: Compost; T4: HMAxCompost; T5: Cd; T6: HMAxCd; T7: CdxCompost y T8: HMAxCdxCompost (Tabla 3).

Tabla 3

Distribución de tratamiento en el experimento

Tratamiento	Clave	Esporas de HMA	Cadmio (mg.kg⁻¹)	Compost por planta (g)
T ₁	Sin HMA, Cd y compost	0	0 (Control)	0
T ₂	HMA	1500	0	0
T ₃	Compost	0	0	200
T ₄	HMA*compost	1500	0	200
T ₅	Cd	0	5	0
T ₆	HMA*Cd	1500	5	0
T ₇	Cd*compost	0	5	200
T ₈	HMA*Cd*compost	1500	5	200

Nota: Tratamientos evaluados en el estudio.

2.5. Unidades experimentales

La parte experimental del presente estudio estuvo constituido por 48 unidades experimentales y cada unidad experimental estuvo conformado por 6 plantas de cacao (submuestras) en su respectiva maceta de forma individual, para cada tratamiento.

El experimento se realizó utilizando macetas de 3 kg llenas de sustratos contaminados con Cd en el transcurso de 120 días. Para favorecer el crecimiento y desarrollo de las plantas, se regaron regularmente con agua de la red pública a fin de mantener la humedad del sustrato en un nivel óptimo. Esto permitió una distribución uniforme del cadmio y facilitó la manipulación de los hongos micorrízicos presentes en el sustrato.

2.6. Identificación de las variables y su mensuración

A continuación, se muestra a la Tabla 2 con las variables identificadas, estructurados según los objetivos específicos; asimismo, se muestra los medios de registro y unidades de medida para cada variable evaluada.

Tabla 4

Identificación de Variables

Evaluar el efecto de los HMA y compost en la absorción de cadmio en suelos, raíces y tallos de cacao en vivero en la Región San Martín			
Variable abstracta	Variable concreta	Medio de registro	Unidad de medida
Cadmio	Suelos de plantas de cacao	Método de EPA 3050B.	mg.kg ⁻¹
Cadmio	Raíces de plantas de cacao	Digestión: HNO ₃ /espectr. Absorción Atómica	mg.kg ⁻¹
Cadmio	Tallos de plantas de cacao	Digestión: HNO ₃ /espectr. Absorción Atómica	mg.kg ⁻¹
Evaluar el efecto de los HMA y compost en el crecimiento vegetal de cacao en vivero en la Región San Martín.			
Variable abstracta	Variable concreta	Medio de registro	Unidad de medida
Altura	Plantas de cacao	Regla milimetrada desde el suelo al ápice de la hoja	Cm
Evaluar el efecto de la colonización extra radicular de HMA de las plantas de cacao en los suelos contaminados con cadmio en vivero de la Región San Martín.			
Variable abstracta	Variable concreta	Medio de registro	Unidad de medida
Colonización micorrízica	Suelo rizosférico de cacao	Metodología desarrollada por Brundrett <i>et al.</i> (1984).	%
Longitud de micelio	Suelo rizosférico de cacao	Se empleó la fórmula de Newman (1966).	Cm

Nota: Variables estudiados por objetivo específico.

2.6.1. Medición de la colonización micorrízica de la raíz y suelo

- **Evaluación de la colonización micorrízica en la raíz**

Para evaluar la colonización micorrízica, se recolectaron raíces terciarias y/o secundarias de las plantas jóvenes de cacao al concluir el experimento. Para facilitar el examen, estas raíces

se tiñeron de azul utilizando azul de metileno, siguiendo una versión modificada del método de Phillips y Hayman (1970). Antes de preparar la masa radicular para el análisis, se extrajeron y se sumergieron en agua abundante para eliminar cualquier partícula de tierra que pudiera adherirse a ellas. Luego, se colocaron las raíces purificadas en tubos de ensayo de 16 x 150 mm y se sumergieron en una solución al 10 % de hidróxido de potasio (KOH) durante 180 minutos, con la finalidad de hidratar adecuadamente las raíces para su posterior evaluación.

Se realizó un proceso crucial para mejorar la visualización de las estructuras del tejido cortical de las raíces. Todos los tubos de ensayo fueron sometidos a un baño maría (90 °C por 45 minutos). Esto permitió la movilidad del contenido citoplasmático y realzó la visibilidad de las estructuras deseadas. Luego de retirarlos del baño maría, se agregaron rápidamente 500 mililitros de agua oxigenada a cada tubo, permitiendo que actuara durante 60 segundos a temperatura ambiental para aclarar los pigmentos de las raíces. Posteriormente, se eliminó el agua oxigenada y se lavaron las raíces tres veces con abundante agua.

En el siguiente paso, se incorporó tinta azul Parker al 5,7 % a cada tubo, asegurándose de que todas las muestras estuvieran completamente cubiertas, y se dejaron reposar durante 15 minutos a temperatura ambiental. Después de este periodo, las muestras se sometieron a otro baño maría de 15 minutos a 90 °C. Una vez finalizado este proceso, se eliminó cualquier exceso de tinta de los tubos y las raíces se lavaron tres veces con lactoglicerol.

Las raíces se tiñeron con azul de metileno y luego se montaron en portaobjetos de microscopio. Para ello, se acopiaron todas las raíces teñidas en una placa, a partir de ahí y con una pinza metálica se colocaron 20 raíces en dos campos (10 raíces en cada campo), cada raíz medía 1,5 cm de largo y se depositó cuidadosamente un portaobjetos para cubrir el objeto quedando disponibles para su observación en el microscopio (Figura 7). La evaluación se llevó a cabo con un microscopio a 10x, 20x y 40x (x = aumento), observándose la existencia y ausencia de estructuras micorrízicas de los HMA (hifas, arbuscúlos, esporas y vesículas) mediante la metodología de Brundrett *et al.* (1996).

Para precisar el porcentaje de colonización micorrízica en raíces de cacao se empleó la siguiente formula:

$$\% \text{ CM} = (n/N) \times 100$$

Donde:

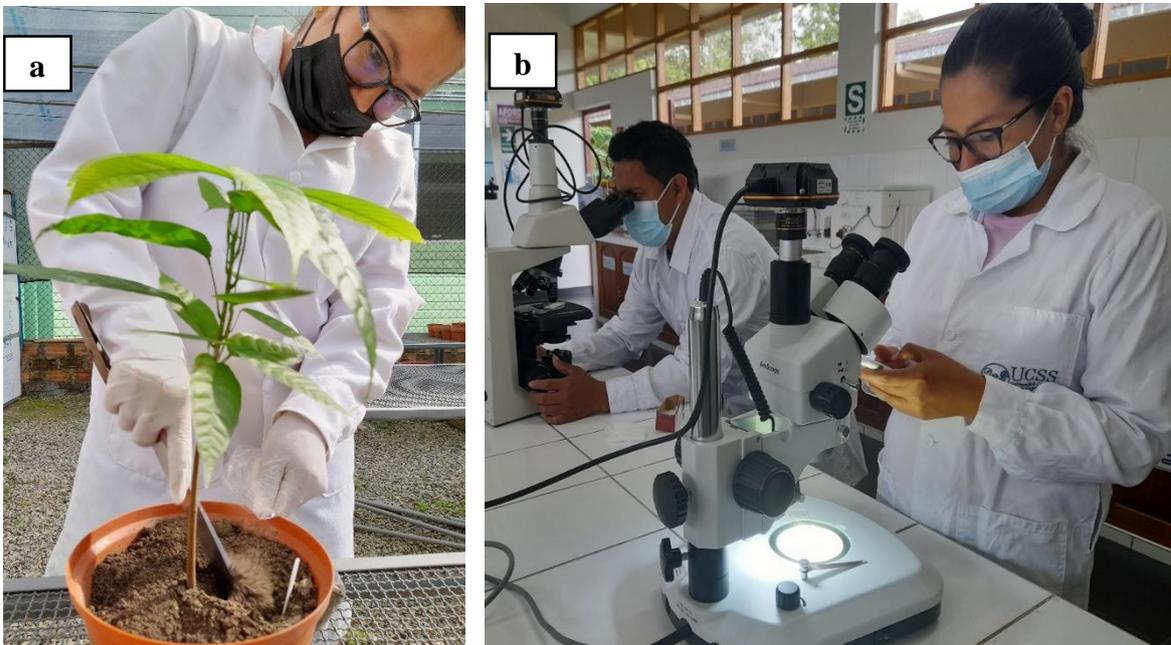
% CM = Porcentaje de colonización micorrízica

n = número total de zonas con presencia de estructuras micorrízicas

N = Número total de segmentos evaluados

Figura 7

Determinación de la colonización micorrízica



Nota. (a), Muestreo de suelo rizosférico para colonización y (b), Evaluación de la colonización micorrízica en microscopio trinocular.

- **Evaluación del micelio extra radical**

La evaluación del micelio extra radical se dio inicio con la recolección de 10 g de suelo, de 3 puntos equidistantes de cada maceta conteniendo los plantones de cacao y colectadas a una profundidad de 15 cm de cada tratamiento. Las muestras de suelo se depositaron en envases Ziploc con cierre seguro que estaban previamente rotuladas de acuerdo con cada tratamiento en estudio. Las muestras fueron teñidas mediante la técnica del gel semisólido y posteriormente cuantificadas por el método de intersección de cuadrantes, metodología generada por Carballar (2009).

El método implicó tomar 1 g de suelo seco, a temperatura ambiente, en un vaso de precipitados de 250 ml y pesarlo en balanza analítica. A esto, se le añadió 5 ml de vinagre blanco para disolver las partículas del suelo y acidificar los fragmentos de micelios. Luego, se incorporó 20 ml de azul de metileno, disuelta en ácido acético, dejándola reposar por 30 minutos. Una vez pasado este tiempo, se llenó el vaso de precipitados con H₂O destilada hasta alcanzar los 100 ml. A continuación, esta mezcla se llevó a baño María a 90 °C durante 90 minutos, agitándola a intervalos de 30 minutos. Al final de este período, las muestras de suelo tratadas se filtraron (tamiz de 38 µm). El residuo recogido en el tamiz se devolvió al vaso de precipitados y se añadió 30 ml de H₂O destilada.

En el segundo paso, la muestra de suelo se colocó nuevamente en un baño de agua (90 °C) durante 1 min, y se agregaron 70 ml de agar con una concentración de 0,64 % p/v y se dejó durante 5 min para alcanzar una concentración final de 0,45%. Después de 5 minutos, las muestras se removieron con una jeringa de 20 ml para mezclarlas bien.

Y por último, se extrajeron alícuotas de 10 ml de la disolución y se vertieron a una placa Petri, cuyo fondo se cubrió con una cuadrícula de 0,5 cm² realizada en papel. Para estimar la longitud de micelio extrarradical, las muestras en placas de Petri se colocaron bajo un microscopio estereocópico a 4,5x y con un contómetro se contó las intersecciones Hifa-Línea (Figura 8). El recuento de micelio se realizó mediante movimientos verticales a lo largo de la superficie de la placa de Petri, teniendo cuidado de contar todas las intersecciones. La cantidad numérica obtenida se transformó a longitud de micelio por unidad de peso de suelo utilizando la ecuación 1, fórmula propuesta por Newman (1966) (ver Apéndice 6).

$$\text{Dónde: } R = \frac{\pi AN}{2H} \dots\dots \text{ecuación 1}$$

R = Longitud de micelio por unidad de peso de suelo

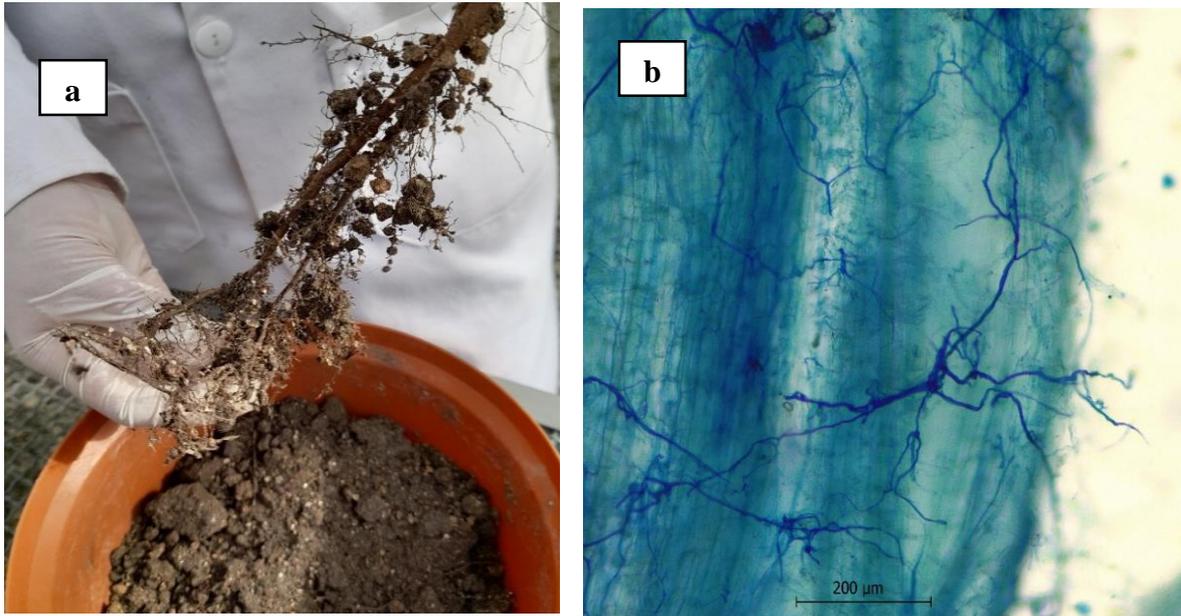
A = Área de la placa

N = Número de intersecciones

H = Longitud total de las líneas de la placa (cm)

Figura 8

Determinación de la longitud de micelio extra radical



Nota. (a), Muestreo de raíces en plantones de cacao para micelio y (b), Evaluación del micelio extra radical en plantones.

2.6.2. Evaluación de la concentración de cadmio en sustrato suelo, raíces y tallos de plantones de cacao

Antes de proceder con el análisis de Cd se colectaron las plantas de cacao a los cuatro meses después del repique en los maceteros, mediante un muestreo destructivo; es decir, fueron removidas con cuidado de su macetero empleando una tijera podadora, desinfectada previamente con alcohol, y se dividió en dos partes: los tallos y la raíz, que fueron colocados en bolsas rotuladas y dispuestas para ser enviadas al laboratorio a realizar sus respectivas evaluaciones (Figura 9). Para el análisis de Cd en suelos se recolectaron muestras de suelos por cada tratamiento en cada unidad experimental; estas fueron enviadas al laboratorio de suelos del I.C.T - Tarapoto. El Cd en suelos se analizó por espectrometría de absorción atómica (método EPA 3050B), como proponen Arévalo-Gardini *et al.* (2016); las raíces y tallos por espectroscopía de absorción atómica (Digestión HNO₃), según recomiendan Jinxiu *et al.* (2020) (ver Apéndice 6).

Figura 9

Preparación de muestras para análisis de cadmio en suelos, raíces y tallos en plantas de cacao



Nota. (a), Muestreo de suelo, raíces y tallos para cadmio y (b), Preparación y etiquetado de muestras para su traslado al laboratorio.

2.7. Diseño estadístico del experimento

La presente investigación fue de tipo experimental, para la cual se trabajó con un modelo DCA con arreglo trifactorial, de la siguiente manera: $2A \times 2B \times 2C$ expresado como [(Consortios de HMA) \times (Dosis de abono) \times (Dosis de cadmio)], haciendo un total de 8 tratamientos y 6 repeticiones.

Factores estudiados

Los factores de la presente investigación se detallan a continuación:

Tabla 5

Descripción de los factores estudiados

Factores	Tipo	Niveles
A	Consortios HMA	A ₁ = Sin HMA
		A ₂ = Consorcio HMA Lamas
B	Dosis de compost	B ₁ = 0 g.planta ⁻¹
		B ₂ = 200 g.planta ⁻¹
C	Dosis de Cd	C ₁ = 0 mg.kg ⁻¹ Cd
		C ₂ = 5 mg.kg ⁻¹ Cd

Tabla 6

Resumen de la interacción de factores en estudio (AxBxC)

Clave	Interacción	Tratamiento
T ₁	A ₁ B ₁ C ₁	Sin HMA + 0 g.planta ⁻¹ compost + 0 mg.kg ⁻¹ Cd
T ₂	A ₁ B ₁ C ₂	Sin HMA + 0 g.planta ⁻¹ compost + 5 mg.kg ⁻¹ Cd
T ₃	A ₁ B ₂ C ₁	Sin HMA + 200 g.planta ⁻¹ compost + 0 mg.kg ⁻¹ Cd
T ₄	A ₁ B ₂ C ₂	Sin HMA + 200 g.planta ⁻¹ compost + 5 mg.kg ⁻¹ Cd
T ₅	A ₂ B ₁ C ₁	HMA + 0 g.planta ⁻¹ compost + 0 mg.kg ⁻¹ Cd
T ₆	A ₂ B ₁ C ₂	HMA + 0 g.planta ⁻¹ compost + 5 mg.kg ⁻¹ Cd
T ₇	A ₂ B ₂ C ₁	HMA + 200 g.planta ⁻¹ compost + 0 mg.kg ⁻¹ Cd
T ₈	A ₂ B ₂ C ₂	HMA + 200 g.planta ⁻¹ compost + 5 mg.kg ⁻¹ Cd

2.8. Análisis estadístico de datos

Previo al análisis inferencial de los resultados se realizaron pruebas de normalidad para poder determinar la distribución paramétrica de los datos. Se aplicó Shapiro-Wilks, debido a la normalidad se realizó análisis de varianza y prueba de Tukey, así mismo, se aplicó la prueba de Kruskal-Wallis. La prueba de normalidad y la de Kruskal-Wallis se realizaron con el programa InfoStat v.2020e. Los datos que representan distribuciones paramétricas se

analizaron mediante ANOVA y para establecer diferencias entre tratamientos se utilizó la prueba de Tukey con una probabilidad de error del 5 % ($\alpha = 0.05$), empleando el programa R versión 4.0.2. Debido a la naturaleza de la investigación, se realizó un ANOVA para el diseño factorial, ya que trabajamos con tres factores. Teniendo como modelo matemático lo propuesto por Porras (2000), el cual se detalla a continuación:

Tabla 7

Diseño de ANOVA para arreglo factorial para el trabajo de investigación

<i>FV</i>	<i>SC</i>	<i>GL</i>	<i>CM</i>	<i>F₀</i>	Valor-p
Efecto A	SC_A	$a-1$	CM_A	CM_A/CM_E	$P(F > F^A_0)$
Efecto B	SC_B	$b-1$	CM_B	CM_B/CM_E	$P(F > F^B_0)$
Efecto C	SC_C	$c-1$	CM_C	CM_C/CM_E	$P(F > F^C_0)$
Efecto AB	SC_{AB}	$(a-1)(b-1)$	CM_{AB}	CM_{AB}/CM_E	$P(F > F^{AB}_0)$
Efecto AC	SC_{AC}	$(a-1)(c-1)$	CM_{AC}	CM_{AC}/CM_E	$P(F > F^{AC}_0)$
Efecto BC	SC_{BC}	$(b-1)(c-1)$	CM_{BC}	CM_{BC}/CM_E	$P(F > F^{BC}_0)$
Efecto ABC	SC_{ABC}	$(a-1)(b-1)(c-1)$	CM_{ABC}	CM_{ABC}/CM_E	$P(F > F^{ABC}_0)$
Error	SC_E	$abc(3-1)$	CM_E		
Total	SC_T	$abc3-1$	CM_T		

Diseño matemático estadístico para el arreglo factorial

$$y_{ijkl} = \mu + \tau_i + \beta_j + \gamma_k + (\tau\beta)_{ij} + (\tau\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\tau\beta\gamma)_{ijk} + u_{ijkl}$$

Donde:

i = Tratamientos

j, k, l = repeticiones

y = Efecto en la absorción de Cadmio y crecimiento vegetal del cacao

μ = media general del rendimiento

τ_i = Efecto de HMA

β_j = Efecto de la dosis de compost

γ_k = Efecto de la dosis de Cadmio

$(\tau\beta)_{ij}$ = Efecto de la interacción de HMA * Dosis de compost

$(\tau\gamma)_{ik}$ = Efecto de la interacción de HMA * Dosis de Cadmio

$(\beta\gamma)_{jk}$ = Efecto de la interacción de Dosis de compost * Dosis de Cadmio

$(\tau\beta\gamma)_{ijk}$ = Efecto de la interacción de HMA * Dosis de compost * Dosis de Cadmio

u = error experimental asociado a la unidad experimental

2.9. Materiales y equipos

Campo y vivero

Bolsas de polietileno
Bolsas de cristal
Balanza gramera
Cámara fotográfica
Espátula y tijera de podar
Etiquetas blancas L5
Lapicero indeleble
Libreta de campo
Máscara de protección
Mandil guardapolvo
Mesa de metal
Tabla de apuntes y etiquetas de plástico
Sustratos (arena y tierra agrícola)
Maceteros con capacidad de 3 kg, cajas de madera
Compost, tierra agrícola y arena
Semillas de cacao, arroz y maíz

Laboratorio

- Ácido acético
- Azul de metileno
- Baño María
- Centrifuga de 5000 revoluciones
- Cloruro de cadmio
- Contómetros manuales
- Hipoclorito de sodio
- Microscopio esteroscópico
- Micropipetas
- Placas de Petri
- Pissetas
- Tamiz de 38 micras y 250 micras
- Tubos de ensayo
- Tubos Falcón
- Vinagre blanco

CAPÍTULO III: RESULTADOS

3.1. Caracterización del compost y sustrato

3.1.1 Caracterización del compost

Posterior a la descomposición se realizó la identificación fisicoquímica del compost empleado (ver Apéndice 1); Asimismo, la evaluación inicial de Cd ayudó a establecer la concentración inicial antes de que la solución de cloruro de cadmio sea incorporada a los diferentes tratamientos (Tabla 6).

Tabla 8

Análisis de cadmio y caracterización del compost

Fuente	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	pH	MO (%)	N (%)	P (mg.kg ⁻¹)	K (mg.kg ⁻¹)	Cd (mg.kg ⁻¹)
Compost	69,52	11,28	19,20	7,98	5,53	0,28	316,00	740,00	<0.1

Nota. Adaptado a partir del informe de análisis del Instituto de Cultivos Tropicales. pH: indica la acidez o alcalinidad del medio, Cd: cadmio, N: nitrógeno, K: potasio, P: fósforo, MO: Materia orgánica,

3.1.2 Características del sustrato por tratamiento

La caracterización fisicoquímica de los sustratos donde se colocaron las semillas de cacao de acuerdo con el tratamiento (Tabla 7), permite evidenciar que el sustrato con mayor cantidad de materia orgánica fue el que se adicionó tanto HMA Lamas y 200 g de compost; además, aquellos que registran valores de pH menores a 7, no se les incorporó compost y HMA Lamas. Los valores más altos de fosforo en los sustratos analizados fueron aquellos donde se añadió 200 g de compost.

Tabla 9*Característica fisicoquímica de los sustratos muestreados por tratamiento*

Tratamientos	pH	MO (%)	P (mg kg⁻¹)
Sin HMA + 0 mg.kg ⁻¹ Cd + Sin compost	6,54a	1,00a	5,45b
Sin HMA + 5 mg.kg ⁻¹ Cd + Sin compost	6,83b	1,23b	7,03c
Sin HMA + 0 mg.kg ⁻¹ Cd + 200 compost	7,47f	1,32c	33,65e
Sin HMA + 5 mg.kg ⁻¹ Cd + 200 compost	7,38e	1,66ef	45,55h
HMA Lamas + 0 mg.kg ⁻¹ Cd + Sin compost	7,04c	1,25bc	4,95 ^a
HMA Lamas + 5 mg.kg ⁻¹ Cd + Sin compost	7,18d	1,47d	7,75d
HMA Lamas + 0 mg.kg ⁻¹ Cd + 200 compost	7,57g	1,64e	35,80f
HMA Lamas + 5 mg.kg ⁻¹ Cd + 200 compost	7,50f	1,73f	44,90g

Nota. Adaptado a partir del informe de análisis del Instituto de Cultivos Tropicales. pH: indica la acidez o alcalinidad del medio, MO: materia orgánica, P: fósforo, HMA Lamas: Hongos micorrízicos arbusculares pertenecientes al consorcio Lamas.

3.2. Crecimiento vegetal en lo que respecta a los HMA, cadmio y compost en plantones de cacao

Se registró incremento de la altura de las plantas de cacao para la mayoría de los tratamientos en comparación con el uso de Cd solo (Fig. 1A). Los tratamientos con HMA + CP, CP solo y HMA solo propiciaron un aumento significativo en la estatura de las plantas de cacao en comparación con las plantas de control.

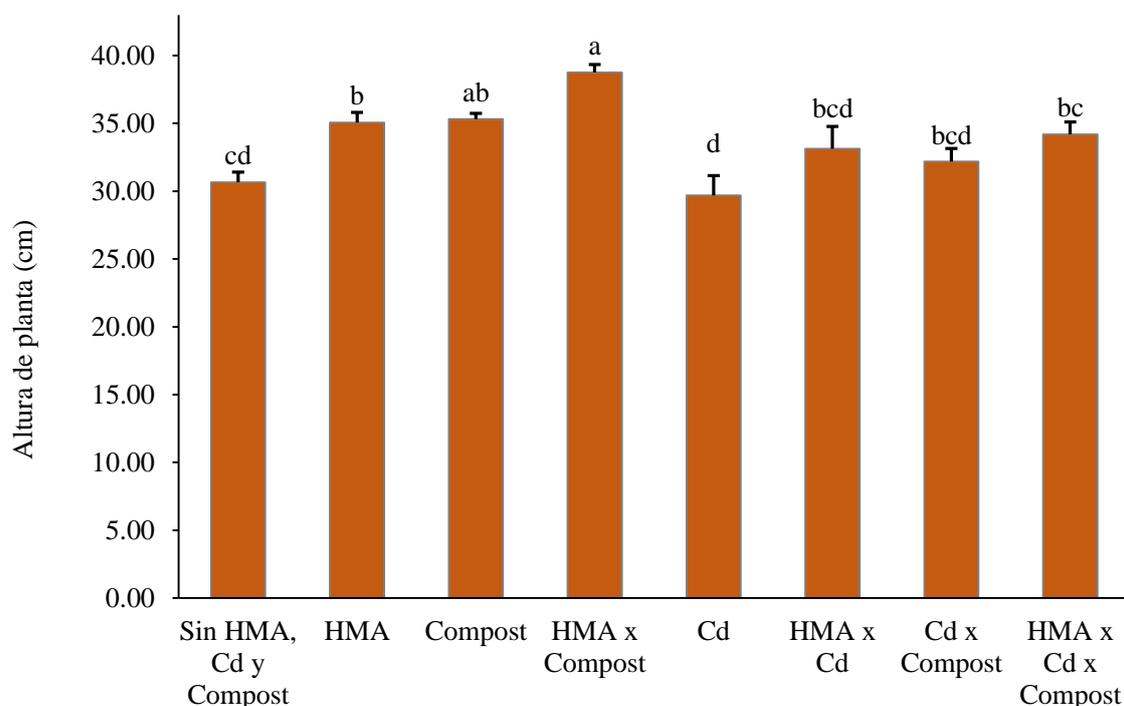
Tabla 10*Valores del crecimiento vegetal relacionado con los HMA, cadmio y compost en plantones de cacao*

Tratamientos	Clave	Repeticiones (cm)			Promedio (cm)
		R1	R2	R3	
T ₁	Sin HMA, Cd y compost	31,26	31,13	29,60	30,66cd
T ₂	HMA	34,73	34,33	36,10	35,05b
T ₃	HMA *Compost	39,40	38,87	38,00	38,76a
T ₄	Compost	35,93	34,93	35,05	35,30ab
T ₅	Cd	27,63	30,83	30,60	29,69d
T ₆	HMA *Cd	32,67	35,33	31,35	33,12bcd
T ₇	Cd*Compost	32,90	34,70	34,95	34,18bc
T ₈	HMA *Cd*Compost	31,76	33,53	31,25	32,18bcd

La adición de HMA, tanto en asociación con compost como de forma individual, tuvo un impacto positivo en la altura de las plantas de cacao (en cm). Sin embargo, la presencia del cadmio tuvo un efecto negativo en su desarrollo. Estos resultados numéricos expusieron que la combinación de compost y HMA fue de mayor efectividad para promover el crecimiento de las plantas de cacao, tal como se muestra en la Figura 10. En los tratamientos T₆, T₇ y T₈, donde se aplicaron HMA, compost y cadmio, se registró un incremento del 11,55, 15,12 y 8,39% respectivamente en comparación con las plantas tratadas únicamente con cadmio puro (29,69 cm).

Figura 10

Efectos de la inoculación de HMA, compost y adición de Cd sobre el crecimiento vegetal de plantas de cacao



3.3. Prueba de normalidad de datos

La evaluación de la normalidad de los datos se realizó mediante la prueba de Shapiro-Wilks. Esta demostró que los valores de Cadmio en el tallo (ppm), la colonización micorrizal (%) y la longitud del micelio (cm) seguían una distribución normal. Sin embargo, las

concentraciones de Cd en el suelo (ppm) y Cadmio en la raíz (ppm) no se ajustaron a la normalidad. Los resultados detallados de la prueba de normalidad se presentan en la tabla 9

Tabla 11

Resultados de la prueba de normalidad de Shapiro Wilks

Variable	p-valor	Decisión
Cadmio en suelo (ppm)	0,0060	0,0060 < 0,05 No presenta normalidad
Cadmio en raíz (ppm)	< 0,0001	0,0001 < 0,05 No presenta normalidad
Cadmio en tallo (ppm)	0,3218	0,3218 > 0,05 Presenta normalidad
Colonización micorrízica (%)	0,3536	0,3536 > 0,05 Presenta normalidad
Longitud de micelo (cm)	0,3148	0,3138 > 0,05 Presenta normalidad

Nota: regla de decisión: i) Si p-valor es mayor al nivel de significancia (p-valor > 0,05), los valores presentan normalidad; ii) Si p-valor es menor al nivel de significancia (p-valor < 0,05), los valores presentan no normalidad, y tienen que ser analizados por una prueba no paramétrica.

3.4. Colonización micorrízica relacionado con los HMA, cadmio y compost en plantones de cacao

En los tratamientos T6, T7 y T8, donde se utilizaron hongos micorrízicos arbusculares (HMA), compost y cadmio, se observó una disminución del nivel de colonización micorrízica en las raíces. Específicamente, se registraron descensos del 12,70; 100,00 y 14,90 % respectivamente en comparación con la parte radical de las plantas inoculadas exclusivamente con HMA puro, donde el porcentaje de colonización fue del 95 % y la longitud del micelio alcanzó los 9,90 cm.

Tabla 12*Promedio de los datos de colonización y longitud de micelio en plántones de cacao*

Nº	Tratamientos	Colonización micorrízica (%)	Longitud de micelio (cm)
1	Sin HMA, Cd y Compost	0	0
2	HMA	95	9,9
3	Compost	0	0
4	HMA x Compost	84	8,57
5	Cd	0	0
6	HMA x Cd	82,89	8,18
7	Cd x Compost	0	0
8	HMA x Cd x Compost	80,33	7,24

3.4.1. Análisis de varianza para la colonización micorrízica

El ANOVA (Tabla 9) del porcentaje de colonización micorrízica en los 8 tratamientos en evaluación, muestra que hay diferencias significativas solamente en la aplicación de HMA, Cd, compost y la asociación con los tratamientos HMA*Cd y HMA*compost. En ese sentido, se aceptó que la colonización micorrízica está influenciada de manera significativa en los cinco tratamientos indicados. Así pues, se obtuvo un coeficiente de correlación (R^2) de 99,69 %, un coeficiente de variación (CV) de 52,64 % y un promedio de colonización de 42,78 %.

Tabla 13

Análisis de varianza (ANOVA) para la colonización micorrízica (%) relacionado los factores: Factor A: HMA; factor B: cadmio y factor C: compost

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	44296,79	7	6328,11	747,79	<0,0001*
HMA	43918,80	1	43918,80	5189,84	<0,0001*
Cadmio	93,34	1	93,34	11,03	0,0043*
Compost	68,92	1	68,92	8,14	0,0115
HMA*Cadmio	93,34	1	93,34	11,03	0,0043*
HMA*Compost	68,92	1	68,92	8,14	0,0115
Cadmio*Compost	26,73	1	26,73	3,16	0,0945 N.S.
HMA*Cadmio*Compt	26,73	1	26,73	3,16	0,0945 N.S.
Error	135,40	16	8,46		
Total	44432,19	23			

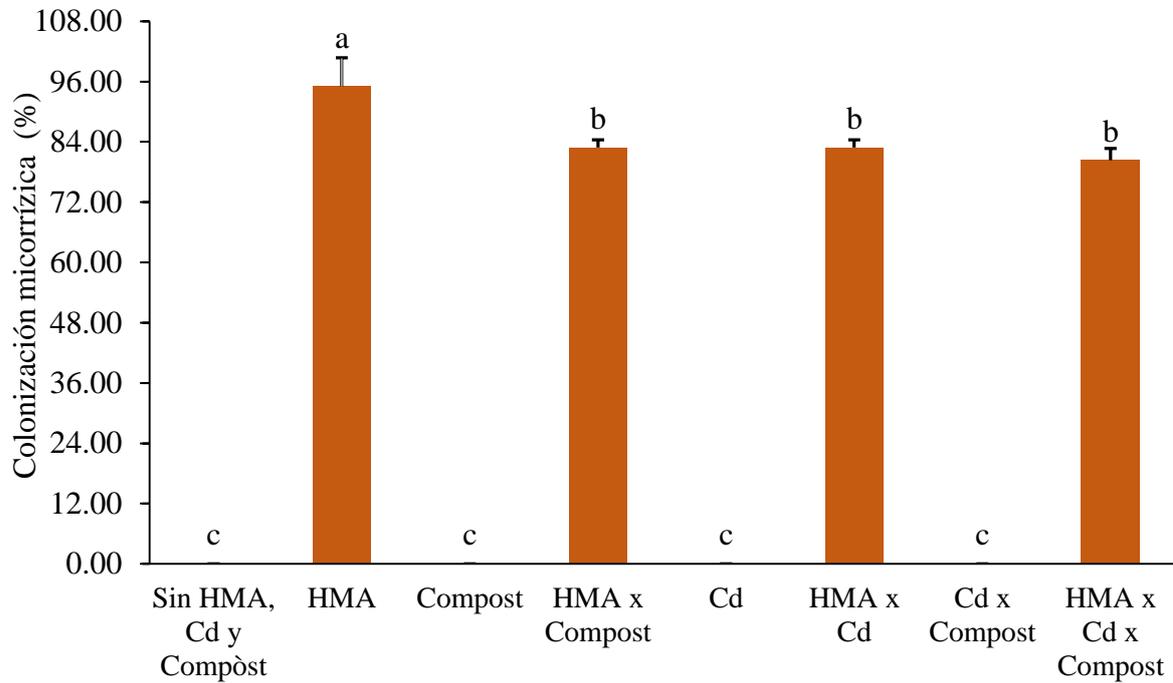
Interpretación de p: *= Altamente significativo; ; N. S= No Significativo X= 42, 78 R² = 99,69 % CV = 52,64 %

3.4.2. Prueba de Tukey para la colonización micorrízica

La colonización micorrízica tubo mejores resultados cuando se inocularon HMA a las plantas de cacao, llegando hasta un 95 %, sin embargo, el tratamiento asociado entre HMA*Cd*compost obtuvo un 80,33 %, en tal sentido, se obtuvo diferencias significativas entre ambos tratamientos (Figura 10). Los tratamientos que no fueron inoculados con HMA no presentaron colonización en ninguno de sus tratamientos.

Figura 11

Efectos de la inoculación de HMA, compost y adición de Cd sobre la colonización micorrízica en plantas de cacao



Nota. Las letras minúsculas indican las diferencias significativas entre los diversos tratamientos ($p < 0,05$).

3.5. Longitud de micelio extra radical (cm) relacionado con los HMA, cadmio y compost en plántones de cacao

3.5.1. Análisis de varianza para la longitud de micelio extra radical

El ANOVA (Tabla 10) que estudia la longitud de micelio (cm) en los ocho tratamientos, indica que existe diferencia altamente significativa solo en la aplicación de HMA. Aceptando por tanto que la longitud de micelio extra radical está afectada en gran medida por la incorporación de hongos micorrízicos arbusculares. Se obtuvieron un coeficiente de correlación (R^2) de 97,00 %, un coeficiente de variación (CV) de 6,64 % y un promedio de colonización de 4,24 %.

Tabla 14

Análisis de varianza (ANOVA) para el de micelio (cm) relacionado con los factores: Factor A: HMA; factor B: cadmio y factor C: compost

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	441,89	7	63,13	73,94	<0,0001**
HMA	430,87	1	430,87	504,64	<0,0001**
Cadmio	3,52	1	3,52	4,12	0,0593 N.S.
Compost	1,93	1	1,93	2,26	0,1520 N.S.
HMA*Cadmio	3,52	1	3,52	4,12	0,0593 N.S.
HMA*Compost	1,93	1	1,93	2,26	0,1520 N.S.
Cadmio*Compost	0,06	1	0,06	0,07	0,7960 N.S.
HMA*Cadmio*Compost	0,06	1	0,06	0,07	0,7960 N.S.
Error	13,66	16	0,85		
Total	455,55	23			

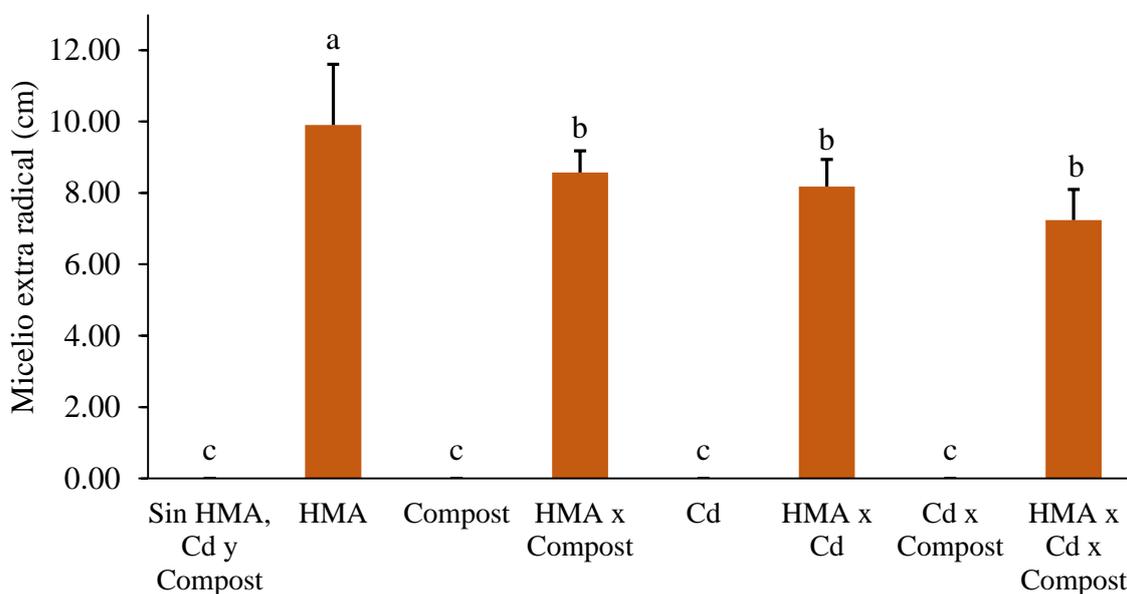
Interpretación de p: **= Altamente significativo; *= Significativo; N. S= No Significativo X= 4,24 R² = 97,00 % CV = 6,64 %

3.5.2. Prueba de Tukey para la longitud de micelio

La longitud de micelio fue mayor después de la incorporación de HMA a las plantas de cacao, logrando llegar a 9,90 cm y el tratamiento con sustrato compuesto por HMA*Cd*compost mostró 7,74 cm, evidenciando diferencias significativas entre ambos tratamientos (Figura 11). En los tratamientos que no fueron inoculados con HMA no se detectó colonización micelar.

Figura 12

Efectos de la inoculación de HMA, compost y adición de Cd sobre la longitud de micelio extra radical en plantas de cacao



Nota. Las letras minúsculas indican las diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,05$).

3.6. Concentración de cadmio en suelos relacionado con los HMA y compost en plántones de cacao

Según los resultados de la prueba de normalidad (Tabla 9), los valores para esta variable no cuentan con normalidad (p -valor = $0,0060 < 0,05$). En ese sentido, los datos fueron sometidos a la prueba de análisis de varianza no paramétrica de Kruskal-Wallis para determinar la existencia de diferencia significativa de las interacciones (Tratamientos). El resultado del p -valor tuvo un valor de $0,4608$, siendo este mayor al nivel de significancia ($0,05$), en conclusión, se puede afirmar que no existe diferencia significativa entre los tratamientos, es decir, las concentraciones de cadmio en el suelo no son influenciadas por ningún de las interacciones (Tratamientos) (Tabla 13).

También, es necesario referir que la prueba de Kruskal-Wallis al no encontrar la existencia de diferencias significativas entre los tratamientos, no corresponde realizar la prueba de medias para datos no paramétricos.

Tabla 15

Análisis de varianza no paramétrica de Kruskal-Wallis para valores de cadmio en suelo (mg.kg-1) relacionado con los factores: Factor A: HMA; factor B: cadmio y factor C: compost

Tratamiento	Repetición	N	Medias	H	p-valor
T ₁ - Sin HMA, Cd y compost	1	1	0,31	22,98	0,4608
T ₁ - Sin HMA, Cd y compost	2	1	0,29		
T ₁ - Sin HMA, Cd y compost	3	1	0,42		
T ₂ – HMA	1	1	5,00		
T ₂ – HMA	2	1	1,22		
T ₂ – HMA	3	1	1,28		
T ₃ – HMA*Compost	1	1	1,57		
T ₃ - HMA*Compost	2	1	1,46		
T ₃ - HMA*Compost	3	1	1,12		
T ₄ – Compost	1	1	0,11		
T ₄ – Compost	2	1	1,48		
T ₄ – Compost	3	1	0,49		
T ₅ – Cd	1	1	0,38		
T ₅ – Cd	2	1	0,38		
T ₅ – Cd	3	1	0,53		
T ₆ – HMA*Cd	1	1	1,30		
T ₆ – HMA*Cd	2	1	1,35		
T ₆ – HMA*Cd	3	1	1,37		
T ₇ – HMA*Cd*Compost	1	1	1,09		
T ₇ – HMA*Cd*Compost	2	1	1,42		
T ₇ – HMA*Cd*Compost	3	1	1,00		
T ₈ – Cd*Compost	1	1	0,26		
T ₈ – Cd*Compost	2	1	0,50		
T ₈ – Cd*Compost	3	1	0,29		

3.7. Cadmio en raíces relacionado con los factores HMA, cadmio y compost en plántones de cacao

Según el análisis de los valores numéricos alcanzados para la prueba de normalidad (Tabla 9), los valores para esta variable no tienen normalidad ($p\text{-valor} = 0,0001 < 0,05$). Con lo cual corresponde aplicar la prueba de análisis de varianza no paramétrica de Kruskal-Wallis con la finalidad de determinar la existencia de diferencia significativa de las interacciones (Tratamientos). El resultado del p-valor tuvo un valor de 0,4608, siendo este mayor al nivel de significancia (0,05); así pues, se afirma que no existe diferencia significativa entre los

tratamientos, es decir, las concentraciones de cadmio en raíces no son influenciadas por ningún de las interacciones (Tratamientos) (Tabla 14).

También, es necesario referir que la prueba de Kruskal-Wallis al no encontrar la existencia de diferencias significativas entre los tratamientos, no corresponde realizar la prueba de medias para datos no paramétricos.

Tabla 16

Análisis de varianza no paramétrica de Kruskal-Wallis para valores de cadmio en suelo (mg.kg-1) relacionado con los factores: Factor A: HMA; factor B: cadmio y factor C: compost

Tratamiento	Repetición	N	Medias	H	p-valor
T ₁ - Sin HMA, Cd y compost	1	1	6,40	23,00	0,4608
T ₁ - Sin HMA, Cd y compost	2	1	4,23		
T ₁ - Sin HMA, Cd y compost	3	1	4,66		
T ₂ – HMA	1	1	16,80		
T ₂ – HMA	2	1	18,80		
T ₂ – HMA	3	1	17,77		
T ₃ – HMA*Compost	1	1	22,00		
T ₃ - HMA*Compost	2	1	21,22		
T ₃ - HMA*Compost	3	1	21,61		
T ₄ – Compost	1	1	1,40		
T ₄ – Compost	2	1	1,31		
T ₄ – Compost	3	1	1,36		
T ₅ – Cd	1	1	2,43		
T ₅ – Cd	2	1	24,65		
T ₅ – Cd	3	1	2,61		
T ₆ – HMA*Cd	1	1	12,58		
T ₆ – HMA*Cd	2	1	13,20		
T ₆ – HMA*Cd	3	1	16,07		
T ₇ – HMA*Cd*Compost	1	1	18,90		
T ₇ – HMA*Cd*Compost	2	1	17,70		
T ₇ – HMA*Cd*Compost	3	1	18,30		
T ₈ – Cd*Compost	1	1	6,88		
T ₈ – Cd*Compost	2	1	5,00		
T ₈ – Cd*Compost	3	1	5,94		

3.8. Cadmio en tallos relacionado con los factores HMA, cadmio y compost en plantones de cacao

3.8.1. Análisis de varianza para el cadmio en tallos

El análisis de varianza (Tabla 13) para el Cd en tallos (mg.kg^{-1}) en los ocho tratamientos en estudio, muestra que existen diferencias significativas en todos los tratamientos. En tal sentido, es aceptada la premisa de que la colonización micorrízica está influenciada de manera significativa cuando se aplica HMA, compost, Cd, y la combinación entre los tres tratamientos. Así pues, se obtuvo un coeficiente de correlación (R^2) de 99,35 %, un coeficiente de variación (CV) de 35,69 % y un promedio de colonización de 14,57 %.

Tabla 17

Análisis de varianza (ANOVA) para el cadmio en tallo (mg.kg^{-1}) relacionado con los factores: Factor A: HMA; Factor B: cadmio y Factor C: compost

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	4143,62	7	591,95	352,39	<0,0001**
HMA	29,53	1	29,53	17,58	0,0007**
Cadmio	4032,63	1	4032,63	2400,67	<0,0001**
Compost	17,17	1	17,17	10,22	0,0056**
HMA*Cadmio	19,26	1	19,26	11,47	0,0038**
HMA*Compost	20,57	1	20,57	12,25	0,0030**
Cadmio*Compost	9,70	1	9,70	5,78	0,0287*
HMA*Cadmio*Compost	14,76	1	14,76	8,79	0,0091**
Error	26,88	16	1,68		
Total	4170,50	23			

Interpretación de p: **= Altamente significativo; *= Significativo; N. S= No Significativo $\bar{X} = 14,57$
 $R^2 = 99,35 \%$ $CV = 35,69 \%$

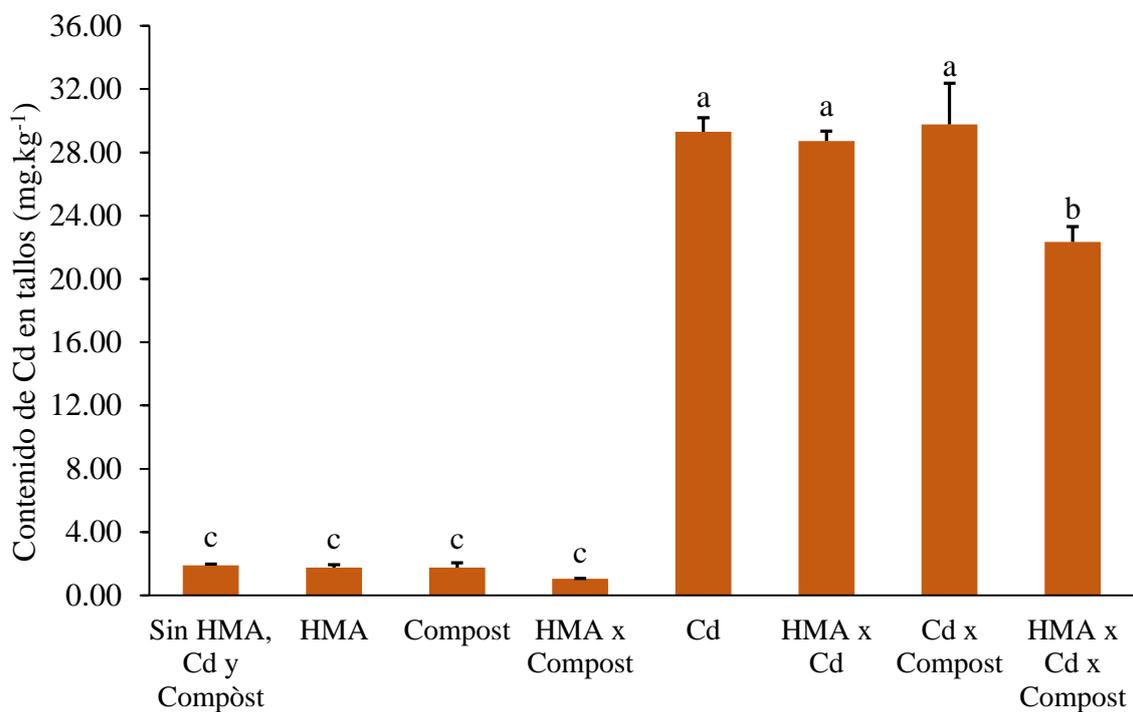
3.8.2. Prueba de Tukey para el cadmio en tallos

En este contexto, se aplicó la prueba de Tukey para evaluar las diferencias entre los grupos en el estudio en cuestión, se calcularon las diferencias mínimas significativas entre los tratamientos (T_2 al T_8), y se compararon con el tratamiento de control (T_1). Los valores numéricos revelaron diferencias significativas entre los tratamientos, lo que implica que al menos uno de los tratamientos difiere significativamente del control, precisamente serían los Tratamientos del T_5 al T_8 .

Al evaluar la concentración de cadmio en tallos de las plantas, se observó que el tratamiento T₆ presentó una disminución del 2,01 % en comparación con el T₅. Por otro lado, el tratamiento T₈ mostró una disminución del 23,78% en la concentración del cadmio, en contraste con el tratamiento T₅ donde se añadió solución de cadmio al sustrato, sin embargo, el T₇ que en incluía una mezcla de cadmio y compost presentó un incremento del 1.57% en comparación con el mismo tratamiento T₅

Figura 13

Efectos de la inoculación de HMA, compost y adición de Cd sobre el de cadmio en tallos



Nota. Las letras minúsculas indican las diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,05$).

CAPÍTULO IV: DISCUSIÓN

4.1. Crecimiento vegetal relacionado con los HMA, cadmio y compost en plántones de cacao

La inoculación de HMA promueve el crecimiento de la planta huésped; además, reduce el estrés por metales pesados al optimizar la absorción de nutrientes y agua, el ajuste osmótico; así como, la actividad fotosintética y antioxidante (Rozpadek *et al.*, 2014; Liu *et al.*, 2018). En esta investigación ha evidenciado que el sustrato, en cuyo tratamiento se incorporó compost y la inoculación de HMA fue el más efectivo para el crecimiento de plántones de cacao. De igual forma, Zhan *et al.* (2019) observaron que la presencia de HMA facilitó el crecimiento de la planta de *Medicago sativa* al aumentar la biomasa vegetal y retener el Cd en el sistema suelo – planta. Así mismo, He *et al.* (2020) identificaron en su estudio que los HMA desempeñan un papel importante en la mejora del rendimiento y la tolerancia de las plantas en suelos contaminados con Cd. Así también, Meter *et al.* (2019) afirman que el cadmio es absorbido por las plantas mediante procesos específicos y no específicos utilizados para ciertos iones (tales como Zn^{2+} , Fe^{2+} , Ca^{2+} , Cu^{2+} y Mg^{2+}). Después de ser absorbido por las raíces, el cadmio (Cd^{2+}) se mueve hacia la xilema y se desplaza a través del floema hasta llegar a la fruta. Se observó que la concentración de cadmio en los tejidos vegetales disminuye desde las raíces, los tallos, hojas, cáscaras, cáscaras de los granos y finalmente los propios granos. El proceso de absorción y distribución de Cd en las plantas de cacao puede verse impactado por varios factores, incluida la edad de los árboles y la nutrición de las plantas, quedando pendiente de análisis la variabilidad de la absorción de cadmio en los diferentes genotipos de cacao.

4.2. Colonización micorrízica (%) relacionado con los HMA, cadmio y compost en plántones de cacao

Se evidenció altos niveles de colonización micorrízica en los tratamientos que incorporó HMA con valores de 80,33 a 95 %, y ausencia del proceso en aquellos tratamientos donde solo se incorporó compost o Cd. El ANOVA presenta diferencias significativas de acuerdo con el modelo estadístico utilizado (p -valor $< 0,05$; p -valor = $< 0,0001$); es decir, las dosificaciones de cada tratamiento tienen diferentes efectos en la colonización micorrízica (%). De igual forma, Vallejos *et al.* (2022) obtuvieron valores similares, en su investigación realizada en la región San Martín, al incorporar solamente el consorcio HMA LAMAS, obteniendo porcentajes de colonización que oscilan de 84 a 89 %. En ambos estudios se muestra que al agregar Cd y compost existe inhibición de HMA, reduciendo su porcentaje de colonización en un 15 % aproximadamente, tal cual mencionan Miransari (2011) y Smith y Smith (2011), donde manifiestan que los metales pesados inhabilitan la propagación de esporas de HMA y la extensión de sus hifas externas.

Asimismo, Liu *et al.* (2014) mostraron que la colonización de raíces aumentó con la adición de Cd durante un crecimiento de un periodo de 6 semanas, luego disminuyó después de 9 semanas de crecimiento. Por otro lado, otras investigaciones manifiestan que el compost es beneficioso para el desarrollo de los HMA al aumentar la disponibilidad de micronutrientes, promoviendo cambios de las propiedades fisicoquímicas del suelo, en la germinación de esporas, la ramificación de hifas y el crecimiento de HMA (Conversa *et al.*, 2015; Liu *et al.*, 2018; Qiao *et al.*, 2015). Sin embargo, dependiendo en la cantidad de aplicación, el tipo de compost, la caracterización química y biológica del suelo; esta colonización micorrízica puede disminuir o permanecer sin cambios (Akhter *et al.*, 2015).

4.3. Longitud de micelio extra radical (cm) relacionado con los HMA, cadmio y compost en plántones de cacao

Para la longitud de micelio extra radical (cm) se evidenció que los valores más altos se tuvieron en la interacción de HMA sin Cd (0 ppm) y compost (0 g) con un valor de 9,90 cm, mientras tanto el que tuvo valores más bajos fue la interacción de HMA agregando Cd

(5 ppm) y compost (200 g) con un valor de 7,24 cm. El ANOVA corrobora la información, debido a que el modelo estadístico usado presenta diferencias significativas (p -valor $< 0,05$; p -valor = $< 0,0001$); es decir las interacciones (tratamientos) tienen efectos diferentes en la longitud del micelio extra radicular (cm), es preciso mencionar que en el grupo de las cuatro primeras interacciones no evidenciaron longitud de micelio debido que no fueron aplicados con HMA. Según otros estudios concuerdan que los metales pesados inhabilitan la germinación de esporas de HMA y la extensión de hifas y esto en condiciones controladas reducen o eliminan el desarrollo y la colonización por HMA de las raíces de las plantas (Weissenhorn *et al.*, 1993). Por lo tanto, Chan *et al.* (2013) afirma que la contaminación por Cd influye negativamente en el crecimiento de micelio extra radical con altos niveles de contaminación, además en su investigación tuvo un hallazgo interesante, pues menciona que el Cd reduce el micelio de plantas cultivadas en suelos sin enmienda orgánica (compost).

Los resultados logrados en este estudio son corroborados por Gai *et al.* (2018) donde la longitud total de micelio extrarradical (ERM) fueron inhibidos por el Cd a una concentración de 25 y 50 mg.kg⁻¹. Sandoval – Pineda *et al.* (2020) encontró que los suelos cacaoteros con Cd tienen menor abundancia, riqueza y diversidad especies de HMA con respecto a lo detectado en suelos con baja concentración de Cd; por lo tanto, La alta concentración y disponibilidad de Cd crea un estado de estrés continuo y constante en la comunidad de HMA, afectando su estructura. Por lo tanto, es necesario incrementar la diversidad de especies de HMA en suelos contaminados con cadmio ya las MA generan simbiosis con las plantas (Rask *et al.*, 2019).

Asimismo, los tratamientos que tuvieron menor pH mostraron mayor longitud de micelio. Como es sabido planta hospedera puede instaurar simbiosis con cualquiera de las especies de HMA presentes (Cuenca *et al.*, 2007).

4.4. Cadmio en suelos (mg.kg⁻¹) relacionado con los HMA, cadmio y compost en plantones de cacao

En los datos correspondientes a la concentración de cadmio en suelo (mg.kg⁻¹) se evidencio que los valores más altos fueron las HMA con Cd (5 ppm) y compost (200 g) con un valor de 1,17 a 1,38 mg.kg⁻¹, mientras tanto el que tuvo valores más bajos fue HMA agregando cd (0 ppm) y compost (0 g) con un valor de 0,34 a 0,69 mg.kg⁻¹. El ANOVA corrobora la información, debido a que el modelo estadístico usado presenta diferencias significativas (p-valor < 0,05; p-valor = < 0,0001) es decir las interacciones (tratamientos) tienen efectos diferentes en el contenido de cadmio presente en suelos de los plantones de cacao.

El pH en los tratamientos donde hubo aplicación de Cd evidenció niveles bajos, y al mismo tiempo dichos elementos tuvieron valores muy altos. Hu *et al* (2014) en su investigación hacen un hallazgo interesante, pues mencionan que a menor pH en el suelo se eleva los niveles de cadmio, esto también es corroborado por Correa *et al.* (2021). Algunas investigaciones intentan responder a este fenómeno, tal es el caso de Shen *et al.* (2016) pues indica que el aumento del pH del suelo podría causar una disminución en la disponibilidad de metales pesados. Ante este escenario, se realizará una apreciación creyendo que la mayor diversidad de especies del consorcio de Lamas que recibieron los tratamientos podría haber afectado en la reducción de cadmio, presunción que podría ser respaldada por las investigaciones de Cabral *et al.* (2015) que manifiesta que las asociaciones de micorrizas pueden ayudar a disminuir la transferencia de metales pesados al cacao comportándose como una barrera de exclusión (Cabral *et al.*, 2015), mientras que Gonzalez-Chavez *et al.* (2002) menciona que estas pueden reaccionar uniendo metales pesados a hifas de hongos.

Finalmente, se infiere que el contenido de Cd en la investigación podría explicarse también por efectos de otros fertilizantes como el estiércol de gallina “gallinaza”, ya que este fue usado en la elaboración del compost, pudiendo tener concentraciones de Cd generalmente bajas, tal cual menciona Mite *et al.* (2010) que encontró niveles de Cd en compost elaborado con gallinaza. La aplicación de estos fertilizantes a los cultivos de cacao podría ocasionar a largo plazo la acumulación de Cd en suelos (Salmanzadeh *et al.*, 2016). Asimismo, los

productores al realizar prácticas inadecuadas en la producción de compost empleando despojos de cosecha de cacao, podrían estar reincorporando Cd presente en las mazorcas de cacao a la capa superior del suelo, esta suposición es respaldada por el estudio de Barraza *et al.* (2017).

4.5. Cadmio en raíces de plántones de cacao (mg.kg⁻¹) relacionado con los factores HMA, cadmio y compost en plántones de cacao

El Cadmio en raíces de plántones de cacao (mg.kg⁻¹) evidenció que los valores más altos (21,61 mg.kg⁻¹) fueron las HMA con Cd (5 ppm) y compost (200 g); sin embargo, un valor de 1,36 mg.kg⁻¹ en el tratamiento que solo incorporó HMA y compost (200 g). El ANOVA corrobora la información, debido a que el modelo estadístico usado presenta diferencias significativas (p-valor < 0,05; p-valor = < 0,0001) es decir las interacciones (tratamientos) tienen efectos diferentes en la concentración de cadmio presente en las raíces de los plántones de cacao. A raíz de lo expuesto, se puede decir que existe diferencias significativas entre el grupo que recibió Cd y el grupo testigo.

Gutiérrez y De La Vara (2012), en su investigación manifiesta que la aplicación de cloruro de cadmio en las plantas de cacao influye significativamente en el contenido de Cd presente en las raíces de los plántones de cacao. Considerando que el cadmio se moviliza en los suelos y es asimilable por algunas plantas perennes como el cacao; además, que ello depende de factores como la textura, la CIC, el contenido de M.O y pH del suelo (Oliva *et al.*, 2020). Por lo tanto, la concentración de cadmio en las raíces de las plantaciones depende de la aplicación de fertilizantes. Tomando en cuenta que elementos como la gallinaza, melaza y otros, influyen en el contenido de cadmio en los suelos y raíces superiores de las plantaciones de cacao (Chavez *et al.*, 2015)

4.6. Cadmio en tallos de plántones de cacao (mg kg⁻¹) relacionado con los factores HMA, cadmio y compost en plántones de cacao

Las concentraciones de Cd en tallos de plántones de cacao (mg kg^{-1}) evidenciaron que los valores más altos fueron las HMA con Cd (5 ppm) y compost (200 g) con un valor de $29,77 \text{ mg.kg}^{-1}$, mientras tanto el que tuvo valores más bajos fue HMA agregando Cd (0 ppm) y compost (200 g) con un valor de $1,04 \text{ mg.kg}^{-1}$. El ANOVA corrobora la información, debido a que el modelo estadístico usado presenta diferencias significativas ($p\text{-valor} < 0,05$; $p\text{-valor} = < 0,0001$) es decir existe las interacciones (tratamientos) tienen efectos diferentes en el contenido de cadmio presente en los tallos de los plántones de cacao. Además, se puede mencionar que existe diferencias significativas entre el grupo que recibió Cd y el grupo de control.

El contenido de cadmio en tallos evaluados presenta una reducción cuando se aplica HMA. Cuando se aplicó 5 mg.kg^{-1} de Cd al suelo, el contenido de Cd evidenció diferencias entre consorcios micorrízicos, tal es así que el tratamiento combinado entre HMA y Cd presentó menor valor de Cd; esta práctica es corroborada por la investigación de Zhang *et al.* (2019), al manifestar que los HMA ayudan en la reducción de concentraciones de Cd. Esta condición se debe a la alta capacidad de los HMA para absorber Cd, a razón de su elevado nivel de propagación de esporas y esporulación extrarradical del micelio; así como, su buena capacidad para intercambio de solutos en la interfase del sistema hongo – célula – raíz bajo concentraciones elevadas de metales (Pawłowska y Charvat, 2004). Por otro lado, Zhang *et al.* (2015) manifiestan que los rasgos biológicos y fisiológicos de las diferentes especies de hongos micorrízicos arbusculares (HMA) podrían influir, en gran medida, en la tasa de colonización, la respuesta de crecimiento de las plantas y la tolerancia al Cd de las plantas. Cabe resaltar, que la influencia de los HMA en la absorción de metales pesados varía según las condiciones de crecimiento de la planta, el socio fúngico de los HMA, el pH del suelo y las concentraciones de los metales pesados (Zhang *et al.*, 2015).

Finalmente, el estudio pudo verificar que los hongos micorrízicos disminuyeron la acumulación de Cd en los tallos de las plantas de cacao, aumentando la retención de metales dentro de las raíces, corroborado por Wang *et al.* (2012). Además, esos resultados fueron corroborados por Vallejos-Torres *et al.* (2022) donde ha demostrado la eficiencia para reducir cadmio tanto en suelo como las raíces de plántones de cacao por HMA, usando *Glomus hoi*, *Rhizoglomus* sp., *Diversispora aurantia*, y *Acaulospora* sp.

CAPÍTULO V: CONCLUSIONES

1. La inclusión de hongos micorrízicos arbusculares (HMA) y compost en el cultivo de cacao tiene un efecto positivo en el desarrollo de las plantas, incluso en presencia de cadmio. Esto se refleja en los resultados de los tratamientos (T₆, T₇ y T₈), donde se aplicaron HMA, compost y cadmio, y se observó un incremento significativo en la altura de las plantas (11,55; 15,12 y 8,39 % respectivamente) en comparación con las plantas tratadas solo con cadmio puro (T₅ = 29,69 cm).
2. La presencia de cadmio tiene un impacto negativo en la colonización de las micorrizas y en la longitud del micelio extra radical, tal como se evidencia en los resultados de los tratamientos T₆, T₇ y T₈, donde se utilizaron hongos micorrízicos arbusculares (HMA), compost y cadmio. En estos tratamientos, se observó una disminución significativa en el nivel de colonización micorrízica en las raíces. Específicamente, se registraron descensos del 12,70; 100,00 y 14,90 % en comparación con las plantas tratadas exclusivamente con HMA puro, donde el porcentaje de colonización alcanzó el 95 %.
3. La longitud del micelio fue mayor en los plantones donde se incorporaron HMA a las plantas de cacao, llegando hasta los 9,90 cm, mientras que en el tratamiento que tuvo un sustrato compuesto por HMA*Cd*compost la longitud de micelio fue de 7,74 cm, por otro lado, los resultados evidencian que la incorporación de Cd a los tratamientos con HMA produjo un descenso significativo de la longitud del micelio extra radical.
4. En la comparación de la concentración de cadmio en los tallos de las plantas se observa (Fig.13.3) que las plantas que recibieron HMA en sus sustratos absorbieron menor cantidad de Cd, tal es así que el sustrato HMA*Cd*Compost absorbió 22,34 mg.kg⁻¹ (el más bajo), seguido de los tallos cuyo sustrato fue HMA*Cd que absorbieron 28,72, mientras que con Compost*Cd el cadmio en los tallos fue de 29,77 mg.kg⁻¹ y en los tallos donde se añadió solo cadmio la concentración fue de 29,31 mg.kg⁻¹, en

conclusión los HMA si contribuyen significativamente a disminuir la presencia de Cd en los tallos, hecho que se ve acentuado por el efecto sinérgico del compost

5. La concentración de cadmio en las raíces de los plantones de los tratamientos a los cuales se agregó CdCl_2 (Cloruro de cadmio), alcanzó valores entre 13,95 a 21,61 mg.kg^{-1} ; obteniendo en consecuencia que en los tratamientos donde solo se agregó compost * HMA se obtuvo valores entre 1,36 a 9,90 mg.kg^{-1} .
6. En los tratamientos que recibieron Cd, se alcanzó valores en el rango de 22,34 a 29,77 mg.kg^{-1} ; sin embargo, las bajas concentraciones de este metal pesado lo obtuvieron los tratamientos que recibieron HMA*compost. Mientras que la inoculación de los HMA redujeron la concentración de cadmio en tallos de plantas de cacao.
6. En conclusión, las adiciones de HMA y compost contribuyen a la disminución de Cd en las plantas de cacao (raíz y tallo) ya que estas atrapan o retienen el Cd en 85 % (de 47 ppm a 6,99 ppm), esto contribuye a mejorar los niveles de calidad del cultivo e ingresos económicos de los productores cacaoteros del valle del Alto Mayo y la región San Martín. A pesar de los grandes hallazgos y resultados, se debe considerar trabajar en variedades de finos de aroma, por su importancia económica y realizar gradientes de compost y HMA, a fin de conocer dosis óptimas.

CAPÍTULO VI: RECOMENDACIONES

1. Ahondar en la investigación sobre la relación entre las especies de HMA y el contenido de Cd en el suelo de plántulas de cacao.
2. Extender este tipo de investigación a otros géneros de variedades autóctonas de cacao encontrados en la Amazonía peruana con características similares y localizar otro género de *Theobroma* con capacidad de retener cadmio en el suelo o en sus partes vegetativas de las plantas.
3. Se deben iniciar nuevos proyectos de investigación basados en la medición de parámetros claves como las enzimas antioxidantes, el estrés hídrico, y el potencial de biorremediación de las plántulas de cacao.
4. Ahondar la investigación sobre la movilización del cadmio en los sustratos, en el compost, su efecto en los HMA y las plantas de cacao.
5. Efectuar nuevas investigaciones sobre especies y géneros específicos de micorrizas arbusculares del cacao y su influencia en el secuestro de cadmio en el sistema radicular y parte vegetativa de las plántulas de cacao.

REFERENCIAS

- Aikpokpodion P.E., Lajide, L. y Aiyesanmi, A.F. (2012). Assessment of Heavy Metals Movility in Selected Contaminated Cocoa Soils in Ondo State, Nigeria. *Global Journal of Environmental Research*, 6 (1): 30-35. <https://docplayer.net/201661487-Assessment-of-heavy-metals-mobility-in-selected-contaminated-cocoa-soils-in-ondo-state-nigeria.html>
- Akhter, A., Hage-Ahmed, K., Soja, G. y Steinkellner, S. (2015). Compost and biochar alter mycorrhization, tomato root exudation, and development of *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici*. *Frontiers in plant science*, 6, 529. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00529>
- Alfvén, T., Elinder C.G., Dea Carlsson, M., Grubb, A., Hellström, L., Persson, B., Pettersson, C., Spång, G., Schütz A. y Järup L. (2000). Low level cadmium exposure and osteoporosis, *Journal of Bone Mineral Research* 15(8), 1579-1586, <https://asbmr.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1359/jbmr.2000.15.8.1579>
- Alloway, B.J. (2013). Sources of Heavy Metals and Metalloids in Soils. In: Alloway B. (eds) Heavy Metals in Soils. *Dordrecht*. 22, 11-50. https://doi.org/10.1007/978-94-007-4470-7_2
- Alvarez-Vera, M., Vázquez, J., Castillo, J., Tucta, F., Quispe, E. y Meza, V. (2018). Potencial de la flora de la provincia del Azuay (Ecuador) como fuente de microorganismos benéficos. *Scientia Agropecuaria*, 9(4), 561-568. <https://dx.doi.org/10.17268/sci.agropecu.2018.04.12>
- Arévalo-Gardini, E., Obando-Cerpa, M. E., Zúñiga-Cernades, L. B., Arévalo-Hernández, C. O., Baligar, V. y He, Z. (2016). Metales pesados en suelos de plantaciones de cacao (*Theobroma cacao* L.) en tres regiones del Perú. *Ecología Aplicada*, 15(2), 81-89. <https://dx.doi.org/10.21704/rea.v15i2.747>
- Arévalo, L., Vallejos-Torres, G. y Gonzales, A. (2021). Desarrollo de tecnologías sostenibles del café con hongos micorrízicos arbusculares. ISBN: 978-612-4372-39-1. Tarapoto - San Martín - Perú. [Archivo de datos]. https://repositorio.iiap.gob.pe/bitstream/20.500.12921/623/1/arevalo_manual_2021.pdf
- Argüello, D., Chavez, E., Laurysen, F., Vanderschueren, R., Smolders, E. y 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 (1), 120-127. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.292>

- Baena, G. (2017). Metodología de la investigación. 3ra. edición. Grupo Editorial Patria. México. ISBN ebook: 978-607-744-748-1 (Archivo PDF). <http://www.biblioteca.cij.gob.mx/Archivos/Materiales de consulta/Drogas de Abuso/Articulos/metodologia%20de%20la%20investigacion.pdf>
- Bansah, K. J. y Addo, W. K. (2016). Phytoremediation potential of plants grown on reclaimed spoil lands. *Ghana Mining Journal*, 16, 68–75. <https://www.ajol.info/index.php/gm/article/view/138987>
- Bateman, A. M. y Muñoz-Rojas, M. (2020). Chapter One - To whom the burden of soil degradation and management concerns. Soil degradation, restoration and management in a global change context. *Science*, 1-22. <https://doi.org/10.1016/bs.apmp.2019.07.001>
- Barraza, F., Moore, R. E., Rehkämper, M., Schreck, E., Lefeuvre, G., Kreissig, K., Coles B. J. y Maurice, L. (2019). “Cadmium isotope fractionation in the soil – cacao systems of Ecuador: a pilot field study”. *The Royal Society of Chemistry* 9, 34011-34022. <https://doi.org/10.1039/C9RA05516A>
- Barraza, F., Schreck, E., Leveque, T., Uzu, G., Lopez, F., Ruales, J., Prunier, J., Marquet, A. 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://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.07.080>
- Barrezueta-Unda, S., Carpio, E. P. y Sarmiento, R. J. (2017). Características del Comercio de cacao a nivel intermediario en la provincia de El Oro-Ecuador. *European Science. Journal*, 13(16), 273-282. <https://doi.org/10.19044/esj.2017.v13n16p273>
- Bhaduri, A. M. y Fulekar, M. H. (2012). Assessment of arbuscular mycorrhizal fungi on the phytoremediation potential of *Ipomoea aquatica* on cadmium uptake. *3 Biotech*, 2(3), 193–198. <https://doi.org/10.1007/s13205-012-0046-8>
- Barrera B. y Silvia E. (2009). El uso de hongos micorrízicos arbusculares como una alternativa para la agricultura. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 7(1), 123-132. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1692-35612009000100014&lng=en&tlng=es.
- Bolan, N., Szogi, A., Chuasavathi, T., Seshadri, B., Rothrock, M. y Panneerselvam, P. (2010). Uses and management of poultry litter. *World's Poultry Science Journal*, 66(4), 673-698. <https://doi.org/10.1017/S0043933910000656>

- Brundrett, M., Bougher, N., Dell, B., Grove, T. y Malajczuk, N. (1996) Working with mycorrhizas in forestry and agriculture. *Australian Centre for International Agricultural Research*, p. 374.
<http://researchrepository.murdoch.edu.au/id/eprint/23747>
- Brundrett, M., Piche, Y. y Peterson, R.L. (1984). A new method for observing the morphology of vesicular-arbuscular mycorrhizae. *Canadian Journal of Botany*, 62(10):2128-2134.
https://www.researchgate.net/publication/233824511_A_new_method_for_observing_the_morphology_of_vesicular-arbuscular_mycorrhizae
- Cabral, L., Soares, C.R.F.S., Giachini, A.J. y Siqueira J.O. (2015). Arbuscular mycorrhizal fungi in phytoremediation of contaminated areas by trace elements: mechanisms and major benefits of their applications. *World J Microbiol Biotechnol.* 31, 1655–1664 (2015). <https://doi.org/10.1007/s11274-015-1918-y>
- Carballar, S., (2009). *Variación temporal de la diversidad de hongos de micorriza arbuscular y el potencial micorrízico en especies silvestres de Agave en Oaxaca*, [Tesis de posgrado]. Instituto Politécnico Nacional, Oaxaca, México].
http://literatura.ciidiroaxaca.ipn.mx/jspui/bitstream/LITER_CIIDIROAX/79/1/CARBALLAR%20HDEZ%20SANTOS%2C%202009.pdf
- Castelo-Gutiérrez, A.A., García-Mendivil, H.A., Castro-Espinoza, L., Lares-Villa, F., Arellano-Gil, M., Figueroa-López, P. y Gutiérrez-Coronado, M.A. (2016). Residual mushroom compost as soil conditioner and bio-fertilizer in tomato production. *Revista Chapingo. Serie horticultura*, 22(2), 83-94. <http://dx.doi.org/10.5154/r.rchsh.2015.06.012>
- Chalmers, A.G. (2001). A Review of fertiliser, lime and organic manure use on farm crops in Great Britain from 1983 to 1997. *Soil Use and Management*, 17, 254-262.
https://www.researchgate.net/publication/227973760_A_review_of_fertilizer_lime_and_organic_manure_use_on_farm_crops_in_Great_Britain_from_1983_to_1987
- Chan, W.F., Li, H., Wu, F.Y., Wu, S.C. y Wong, M. H. (2013). Arsenic uptake in upland rice inoculated with a combination or single arbuscular mycorrhizal fungi. *Journal of Hazardous Materials.* 262, 1116–1122.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.08.020>
- Chavez, E., He, Z. I., Stoffella, P. J., Mylavarapu, R. S., Li, Y. C., Moyano, B., y Baligar, V. C. (2015). Concentration of cadmium in cacao beans and its relationship with

soil cadmium in southern Ecuador. *Science of the Total Environment*, 533, 205–214. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.06.106>

Conversa, G., Bonasia, A., Lazzizzera, C. y Elia, A. (2015). Influence of biochar, mycorrhizal inoculation, and fertilizer rate on growth and flowering of *Pelargonium* (*Pelargonium zonale* L.) plants. *Frontiers in Plant Science*. 6, 429. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00429>

Correa, J. E., Ramírez, R., Ruíz, O. y Leiva, E. I. (2021). Effect of soil characteristics on cadmium absorption and plant growth of *Theobroma cacao* L. seedlings. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 101(13), 5437–5445. <https://doi.org/10.1002/jsfa.11192>

Cortés, M. E. y Iglesias, L. M. (2004). Generalidades de la Metodología de la Investigación. México: Universidad Autónoma del Carmen, México. (Archivo PDF). https://www.unacar.mx/contenido/gaceta/ediciones/metodologia_investigacion.pdf

Cuatrecasas, J. (1964). Cacao and its allies a taxonomic revision of genus *Theobroma*. Bulletin of the United States National Museum, *Smithsonian Institution*. <https://repository.si.edu/handle/10088/27110>

Cuenca, G., Cáceres, A., Oirdobro, G., Hasmy, Z. y Urdaneta, C. (2007). Las micorrizas arbusculares como alternativa para una agricultura sustentable en áreas tropicales. *Interciencia* 32(1), 23-29. <https://www.redalyc.org/pdf/339/33932104.pdf>

Cui, L., Li, L., Zhang, A., Pan, G., Bao, D. y Chang, A. (2011). Biochar amendment greatly reduces rice Cd uptake in a contaminated paddy soil: A two-year field experiment, *BioRes*. 6(3), 2605-2618. https://www.researchgate.net/publication/277029911_Biochar_amendment_greatly_reduces_rice_CD_uptake_in_a_contaminated_paddy_soil_A_two-year_field_experiment

Del Águila, K.M., Vallejos-Torres, G., Arévalo, L.A. y Becerra, A.G. (2018). Inoculación de Consorcios Micorrícicos Arbusculares en *Coffea arabica*, Variedad Caturra en la Región San Martín. *Información tecnológica*, 29(1), 137-146. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642018000100137>

Deveci, E., y Deveci, S. (2011). The Effects of Cadmium Chloride on the Oesophagus of Rats. *International Journal of Morphology*, 29(3), 678-680. <https://dx.doi.org/10.4067/S0717-95022011000300002>

- Florida R. N. (2021). Revisión sobre límites máximos de cadmio en cacao (*Theobroma cacao* L.). *LA GRANJA. Revista de Ciencias de la Vida*, 34(2), 117-130. <https://doi.org/10.17163/lgr.n34.2021.08>
- Florida, N., García, P., Hildauro, J., Salinas, J., Severino, S., Escobar, F. y Torres, J. (2019). Efecto de compost y NPK sobre los niveles de microorganismos y cadmio en suelo y almendra de cacao. *Revista de Investigaciones Altoandinas*, 21(4), 264-273. <https://doi.org/10.18271/ria.2019.503>
- Gai, J. P., Fan, Q., Zhang, S. B., Mi, N. N., Christie, P., Li, X. L. y Feng, G. (2018). "Direct effects of soil cadmium on the growth and activity of arbuscular mycorrhizal fungi". *Rhizosphere* 7, 43-48, <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2018.07.002>
- Ganoza, R., Normando, E., Rojas, J., Olgún, U., Zegarra, M., Moscol, M. y Ganoza, R. (2012). Manual del cultivo de cacao blanco en Piura. Edit. Athenea, comunicación y cultura: Perú. <http://infocafes.com/portal/wp-content/uploads/2016/04/Manual-de-cacao-24.09.pdf>
- García, R. F. (2012). Principales obligaciones medioambientales para la pequeña y mediana empresa. Editorial Club Universitario. <https://www.edisofer.com/9788484545217-principales-obligaciones-medioambientales-para-la-pequea-y-mediana-empresa>
- García, C. (2000). Catálogo de cultivares de Cacao del Perú. Edit. R&F Publicaciones y servicios S.A.C. Lima, Perú. <https://es.scribd.com/document/313320173/cultivares-de-cacao-en-el-peru-pdf>
- Gonzalez-Chavez, C., D'Haen, J., Vangronsveld, J. y Dodd, J.C. (2002). Copper sorption and accumulation by the extra radical mycelium of different *Glomus* spp. (arbuscular mycorrhizal fungi) isolated from the same polluted soil. *Plant and Soil*. 240, 287–297. <https://doi.org/10.1023/A:1015794622592>
- Gutiérrez, H y De La Vara, R. (2012). Análisis y diseño de experimentos. 3° ed. México: McGrawHill. https://kupdf.net/download/an-aacute-lisis-y-dise-ntilde-o-de-experimentos-3a-ed-guti-eacute-rrez-h-de-la-vara-r-mcgraw-hill-m-eacute-xico-2012_5af84284e2b6f5e246f8d71d_pdf
- He, B., Yun, Z., Shi, J. y Jiang, G. (2013). Research progress of heavy metal pollution in China: Sources, analytical methods, status, and toxicity. *Chin. Sci. Bull.* 58, 134–140. <https://doi.org/10.1007/s11434-012-5541-0>
- Hernández, R., Fernández, C. y Baptista, P. (2014). *Metodología de la investigación*. Sexta Edición. ISBN: 978-1-4562-2396-0, México. (Archivo

PDF). <https://www.esup.edu.pe/wp-content/uploads/2020/12/2.%20Hernandez.%20Fernandez%20y%20Baptista-Metodolog%C3%ADa%20Investigacion%20Cientifica%206ta%20ed.pdf>

- Marcano, T. H. (2011). La contaminación con cadmio en suelos agrícolas. *Venesuelos*, 8(1 y 2), 42-47. <https://studylib.es/doc/7454720/la-contaminaci%C3%B3n-con-cadmio-en-suelos-agr%C3%ADcolas>
- He, Y. M., Yang, R., Lei, G., Li, B., Jiang, M., Yan, K., ... y Li, Y. (2020). Arbuscular mycorrhizal fungi reduce cadmium leaching from polluted soils under simulated heavy rainfall. *Environmental Pollution*, 263, 114406. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114406>
- Hildebrandt, U., Regvar, M. y Bothe, H., (2007). Arbuscular mycorrhiza and heavy metal tolerance. *Phytochemistry* 68, 139-146. <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2006.09.023>
- Hu, Y., Cheng, H. y Tao, S. (2016). The Challenges and Solutions for Cadmium-contaminated Rice in China: A Critical Review, *Environment international*. 92-93, 515–532 <https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.04.042>
- Hu, J., Wu, F., Wu, S., Lam, C.L., Lin X. y Wong. M.H. (2014). Biochar and Glomus caledonium Influence Cd Accumulation of Upland Kangkong (*Ipomoea aquatica* Forsk.) Intercropped with Alfred Stonecrop. *Sedum alfredii* Hance. 4, 4671. <https://doi.org/10.1038/srep04671>
- Huamaní-Yupanqui, H. A., Mansilla-Minaya, L. G., Florida-Rofner, N., y Neira-Trujillo, G. M. (2012). Presencia de metales pesados en cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.) orgánico. *Acta agronómica*, 61(4), 339-344. <https://doi.org/10.15446/acag>
- Huang, H., Zhang, S., Bao-Dong, C., Naiying, W., Xiao-Quan, S. y Christy, P. (2006). Uptake of atrazine and cadmium from soil by maize (*Zea mays* L.) in association with the arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus tunicatum*. *Journal Agricultural Food Chemistry*. 54, 9377- 9382. <https://doi.org/10.1021/jf061699g>
- Huaraca-Fernandez, J.N., Pérez-Sosa, L., Bustinza-Cabala, L.S. y Pampa-Quispe, N.B. (2020). Organic amendments in the immobilization of cadmium in contaminated agricultural soils: a review. *Información tecnológica*, 31(4), 139-152. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642020000400139>
- Janeeshma, E. y Puthur, J.T. (2020). Direct and indirect influence of arbuscular mycorrhizae on enhancing metal tolerance of plants. *Arch Microbiol*. 202, 1–16. <https://doi.org/10.1007/s00203-019-01730-z>

- Jinxiu, Z. S., Lin, Y., Kai, L., Mingrui, H., Yongmei, Z., Yanqun, Z., Fangdong, L. y Tao, L. (2020). An arbuscular mycorrhizal fungus increased the macroaggregate proportion and reduced cadmium leaching from polluted soil, *International Journal of Phytoremediation*. 22, 1-9. <https://doi.org/10.1080/15226514.2020.1849014>
- Khan, M.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://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.06.030>
- Khan A., Khan S., Khan M. A., Qamar Z. y Wagas M. (2015). The uptake and bioaccumulation of heavy metals by food plants on plant nutrients, and associated health risk: a review. *Environmental Science Pollution*, 22:13772-13799. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26194234/>
- Kirkham, M. B. (2006). Cadmium in plants on polluted soils: effects of soil factors, hyperaccumulation, and amendments. *Geoderma*, 137(1-2), 19-32. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2006.08.024>
- Kumar, B.L. y Gopal, D.V. (2015). Effective role of indigenous microorganisms for sustainable environment. *3 Biotech*. 5, 867–876 <https://doi.org/10.1007/s13205-015-0293-6>
- Lanza, J. G., Churión, P. C., Liendo, N. J., y López, V. H. (2016). Evaluación del contenido de metales pesados en cacao (teobroma cacao l.) de santa bárbara del Zulia, Venezuela. *Saber*, 28(1), 106-115. <http://ve.scielo.org/pdf/saber/v28n1/art11.pdf>
- Leal, F., Sánchez, P. y Valderrama, E. (2000). *El género Theobroma en estado silvestre en Venezuela*. Maracay, Centro Nacional de Conservación de los Recursos Filogenéticos y FONAIAP-Miranda. <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=VE2006400310>
- Lenoir, I., Fontaine, J. y Sahraoui, A. L. (2016). Arbuscular mycorrhizal fungal responses to abiotic stresses: a review. *Phytochemistry*, 123, 4-15. <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2016.01.002>
- Li, H., Luo, N., Zhang, L. J., Zhao, H. M., Li, Y. W., Cai, Q. y Mo, C. H. (2016). Do arbuscular mycorrhizal fungi affect cadmium uptake kinetics, subcellular distribution and chemical forms in rice? *Science of the Total Environment*, 571, 1183-1190. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.07.124>

- Li, L.-Z., Tu, C., Peijnenburg, W. J. G. y Luo, Y.-M. (2017). Characteristics of cadmium uptake and membrane transport in roots of intact wheat (*Triticum aestivum* L.) seedlings. *Environmental Pollution*, 221, 351–358. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.11.085>
- Liu, L., Li, J.W., Yue, F.X., Yan, X.W., Wang, F.Y., Bloszies, S. y Wang, Y.F. (2018). Effects of arbuscular mycorrhizal inoculation and biochar amendment on maize growth, cadmium uptake and soil cadmium speciation in Cd-contaminated soil. *Chemosphere* 194, 495–503. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.12.025>
- Liu, L. Z., Gong, Q. Zhang, Y. L. y Li. P. J. (2014). Growth, cadmium uptake and accumulation of maize (*Zea mays* L.) under the effects of arbuscular mycorrhizal fungi. *Ecotoxicology*. 23, 1979–1986 (2014). <https://doi.org/10.1007/s10646-014-1331-6>
- Llatance, W. O., Gonza, C. J., 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. <http://dx.doi.org/10.21704/rfp.v33i1.1156>
- López, Y. M., Cunias, M. Y. y Carrasco, Y. L. (2020). El cacao peruano y su impacto en la economía nacional. *Revista Universidad y Sociedad*, 12(3), 344-352. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2218-36202020000300344&lng=es&tlng=es.
- Madejón P., Navarro-Fernández C.M., Madejón E, López-García A. y Marañón T. (2021) Plant response to mycorrhizal inoculation and amendments on a contaminated soil. *Sci Total Environ* 789:147943. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147943>
- Mahmud, A., Mehmood, S., Hussain, J. y Ahmad, S. (2015). Composting of poultry dead birds and litter. *World's Poultry Science Journal* 71(4), 621-629. <https://doi.org/10.1017/S0043933915002408>
- Martínez, Y., y Rivero, C. (2005). Evaluación de diferentes métodos para determinar las fracciones de metales pesados presentes en el suelo. *Revista Ingeniería UC*, 12(3), 14-20. <https://www.redalyc.org/pdf/707/70712303.pdf>
- McLaughlin, M. J., Maier, N. A., Rayment, G. E., Sparrow, L. A., Berg, G., McKay, A. y Smart, M. K. (1997). Cadmium in Australian potato tubers and soils. *Journal of Environmental Quality*, 26(6), 1644-1649. <https://doi.org/10.2134/jeq1997.00472425002600060026x>

- Mendoza-López, K. L., Mostacero-León, J., López-Medina, S. E., Gil-Rivero, A. E., Cruz-Castillo, A. y Villena-Zapata, L. (2021). Cadmio en plantaciones de *Theobroma cacao* L. "cacao" en la región San Martín (Lamas), Perú. *Manglar* 18(2), 169-173. <https://erp.untumbes.edu.pe/revistas/index.php/manglar/article/view/239>
- Ministerio de Agricultura y Riego [MINAGRI] (2019). Plan Nacional de Cultivos. Campaña Agrícola 2019-2020 Reporte de precio y mercado de cacao, Lima, Perú. https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/471867/Plan_Nacional_de_Cultivos_2019_2020b.pdf
- Ministerio de Agricultura y Riego [MINAGRI] (2016). Estudio del cacao en el Perú y en el mundo. Dirección de Estudios Económicos e Información Agraria. Primera Edición. <https://camcafeperu.com.pe/admin/recursos/publicaciones/Estudio-cacao-Peru-y-Mundo.pdf>
- Ministerio de Agricultura y Riego [MINAGRI]. (2003). Caracterización de las zonas productoras de cacao en el Perú y su competitividad. Lima, Perú. http://infocafes.com/portal/wp-content/uploads/2016/03/cacao_completo.pdf
- Ministerio del Ambiente [MINAM] (2014). Guía para el muestreo de suelos. <https://www.minam.gob.pe/calidadambiental/wp-content/uploads/sites/22/2013/10/GUIA-PARA-EL-MUESTREO-DE-SUELOS-final.pdf>
- Miransari, M. (2011). Hyperaccumulators, arbuscular mycorrhizal fungi and stress of heavy metals. *Biotechnol. Advances* 29(6), 645-53. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2011.04.006>
- Mite, F., Carrillo, M. y Durango, W. (2010). Avances del monitoreo de presencia de cadmio en almendras de cacao, suelos y aguas en Ecuador. In XII congreso Ecuatoriano de la Ciencia del suelo. 1, 1-21. <http://www.secsuelo.org/wp-content/uploads/2015/06/6.-Francisco-Mite.-Cadmio.-INIAP.pdf>
- Motamayor, J.C., Risterucci, A.M., Lopez, P.A., Ortiz, C.F., Moreno, A. y Lanaud, C. (2002). Cacao domestication I: the origin of the cacao cultivated by the Mayas. *Heredity*. 89, 380–386. <https://doi.org/10.1038/sj.hdy.6800156>
- Newman, E.I. (1996). A Method of estimating the total length of root in a sample. *Journal of Applied Ecology*, 3(1), 139-145. <https://doi.org/10.2307/2401670>

- Oliva M., Rubio, K. Epquin M. y Gand, M. (2020). Cadmium uptake in native cacao trees in agricultural lands of Bagua, Peru. *Agronomy* 10(10), 1551. <https://doi.org/10.3390/agronomy10101551>
- Palencia, G., Gómez, R. y Gúiza, O. (2009). Nuevas tecnologías para instalar viveros y producir clones de cacao (*Theobroma cacao* L.). Manual Técnico. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (CORPOICA). Bucaramanga, Colombia. 32 p. http://infocafes.com/portal/wp-content/uploads/2016/06/Tecnolog%C3%ADas_clones_y_v%C3%ADveros.pdf
- Parmar, P., Kumari, N. y Sharma, V. (2013). Structural and functional alterations in photosynthetic apparatus of plants under cadmium stress. *Botanical studies*, 54(1), 45. <https://doi.org/10.1186/1999-3110-54-45>
- Pawlowska, T.E. y Charvat, I. (2004). Heavy metal stress and development patterns of arbuscular mycorrhizal fungi. *Appl. Environ. Microbiol.* 70(11), 6643-6649. <https://doi.org/10.1128/AEM.70.11.6643-6649.2004>
- Pérez, U.A., Ramírez, M., Serralde, D.P., Peñaranda, A.M., Wilches, W.A., Ramírez, L. y Rengifo G. A. (2019). Hongos formadores de micorrizas arbusculares (HFMA) como estrategia para reducir la absorción de cadmio en plantas de “cacao” *Theobroma cacao*. *Terra Latinoamericana*, 37(2), 121-130. <https://doi.org/10.28940/terra.v37i2.479>
- Phillips, J.M. y D.S. Hayman. (1970). Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection, *Transactions of the British Mycological Society*, 55(1), 158–161. [https://doi.org/10.1016/S0007-1536\(70\)80110-3](https://doi.org/10.1016/S0007-1536(70)80110-3)
- Prieto, J., González, C., Román, C. A. y Prieto, F. (2009). Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua. *Tropical and Subtropical. Agroecosystems* 10 (1), 29-44. <https://www.redalyc.org/pdf/939/93911243003.pdf>
- Pereira, R., Furtado, A.A., Silva, L., Mangabeiraa, P.A.O., Souza, J.O., Pirovania, C.P., Ahnerta, D. y Baligar, V.C. (2018). Photosynthetic, antioxidative, molecular and ultrastructural responses of young cacao plants to Cd toxicity in the soil. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 144, 148–157. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.06.006>

- Qaswar, M., Hussain, S. y Rengel, Z. (2017). Zinc fertilisation increases grain zinc and reduces grain lead and cadmium concentrations more in zincbiofortified than standard wheat cultivar, *Science of the Total Environ*, 605, 454–460. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.06.242>
- Qiao, Y.H., Crowley, D., Wang, K., Zhang, H.Q. y Li, H.F. (2015). Effects of biochar and arbuscular mycorrhizae on bioavailability of potentially toxic elements in an aged, contaminated soil. *Environmental Pollution* 206, 636–643. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.08.029>
- Qing C., Feng-wei, D., Qi-fan, W., Liang, P., Zhen-hua, D. y Wei, G. (2018). Effects of arbuscular mycorrhizal symbiosis on growth, nutrient and metal uptake by maize seedlings (*Zea mays* L.) grown in soils spiked with Lanthanum and Cadmium. *Environmental Pollution*. 607-615. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.06.003>
- Qiu, Q., Wang, Y., Yang, Z. y Yuan, J. (2011). Efectos del fósforo suministrado en el suelo sobre la distribución subcelular y las formas químicas del cadmio en dos cultivares de col china (*Brassica parachinensis* L.) que difieren en la acumulación de cadmio. *Toxicología alimentaria y química*, 49 (9), 2260-2267. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2011.06.024>
- Rask, K. A., Johansen, J. L., Kjøller, R. y Ekelund, F. (2019). Differences in arbuscular mycorrhizal colonisation influence cadmium uptake in plants. *Environmental and Experimental Botany*, 162, 223-229. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2019.02.022>
- Ramtahal, G., Umaharan, P., Hanuman, A., Davis, C. y Ali, L. (2019). The effectiveness of soil amendments, biochar and lime, in mitigating cadmium bioaccumulation in *Theobroma cacao* L. *Science of The Total Environment*, 693 (25), 133563. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.369>
- Rizwan M., Ali, S., Hussain, A., Ali, Q., Shakoore, M.B., Zia-Ur-Rehman, M., Farid M. y Asma, M. (2017). Effect of zinclysine on growth, yield and cadmium uptake in wheat (*Triticum aestivum* L.) and health risk assessment, doi: 10.1016/j.chemosphere.2017.08.071, *Chemosphere*, 187, 35–42. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.08.071>
- Rodríguez, P. R. A., Lopes, S. J., Swarowsky, A., Rosales R., Nogueira C. U. y Maffei, M. (2016) Non-destructive models to estimate leaf area on bell pepper crop. *Ciência Rural* 46:1938-1944, <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20151324>

- Román, P. (2013). Manual del compostaje del agricultor experiencias en América Latina. Organización de las Naciones Unidas para la alimentación y Agricultura, Santiago de Chile. <https://www.fao.org/3/i3388s/I3388S.pdf>
- Romero, C.A. (2016). Estudio del Cacao en el Perú y el Mundo. Ministerio de Agricultura y Riego. <https://camcafeperu.com.pe/admin/recursos/publicaciones/Estudio-cacao-Peru-y-Mundo.pdf>
- Rosales-Huamaní, J., Centeno-Rojas, L., Cajacuri-Perez, J., Luis-Breña, J. y Chávez-Chapana, C. (2021). Identificación de cadmio y plomo en los cultivos de cacao ubicados en la zona de Satipo – Junín. *Revista Técnica* 31(2), 83-89. <https://doi.org/10.21754/tecnia.v21i2.1062>
- Rozpądek, P., Wężowicz, K., Stojakowska, A., Malarz, J., Surówka, E., Anielska, T., ... y Turnau, K. (2014). Mycorrhizal fungi modulate phytochemical production and antioxidant activity of *Cichorium intybus* L. (Asteraceae) under metal toxicity. *Chemosphere*, 112, 217-224. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.04.023>
- Salmanzadeh, M., Balks, M., Hartland, A. y Schipper, L. (2016). Cadmium accumulation in three contrasting New Zealand soils with the same phosphate fertilizer history. *Geoderma Regional*, 7(3), 271–278. <http://doi.org/10.1016/j.geodrs.2016.05.001>
- Salt, D.E, Blaylock, M., Kumar, N.P., Dushenkov, V., Ensley, B.D., Chet, I. y Raskin, I. (1995). Phytoremediation: a novel strategy for the removal of toxic metals from the environment using plants. *Biotechnology* 13(5), 468-74. <https://www.sciencebase.gov/catalog/item/50537dcbe4b097cd4fcd6df>
- Sánchez, Ó.J., Ospina, D.A. y Montoya, S. (2017). Compost supplementation with nutrients and microorganisms in composting process. *Waste Management* 69, 136-153. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.08.012>
- Sandoval-Pineda, J.F., Pérez-Moncada, U.A., Rodriguez, A. y Torres, E. (2020). Alta presencia de cadmio resulta en baja diversidad de hongos formadores de micorrizas arbusculares asociados a cacao (*Theobroma cacao* L.). *Acta Biol Colomb.* 25(3), 333-344. <https://doi.org/10.15446/abc.v25n3.78746>
- Sarkar, S., Pal, S. y Chanda, S. (2016). Optimization of a vegetable waste composting process with a significant thermophilic phase. *Procedia Environmental Sciences* 35, 435-440. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.07.026>

- Scaccabarozzi, D., Castillo, L., Aromatisi, A., Milne, L., Búllon, A. y Muñoz-Rojas M. (2020). Soil, site, and management factors affecting cadmium concentrations in cacao-growing soils. *Agronomy* 10(6), 806. <https://doi.org/10.3390/agronomy10060806>
- Shaheen, S.M., Rinklebe, J. y Selim, M.H. (2014). Impact of various amendments on immobilization and phytoavailability of nickel and zinc in a contaminated floodplain soil. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 12, 2765–2776 <https://doi.org/10.1007/s13762-014-0713-x>
- Shen, H., Christie, P. y Li, X. (2016). Uptake of zinc, cadmium and phosphorus by arbuscular mycorrhizal maize (*Zea mays* L.) from a low available phosphorus calcareous soil spiked with zinc and cadmium. *Environ Geochem Health.* 28, 111 (2006). <https://doi.org/10.1007/s10653-005-9020-2>
- Sebastian, A. y Prasad, M.N.V., (2013). Cadmium Minimization in Rice. *A review*, <https://doi.org/10.1007/s13593-013-0152-y>, *Agronomy for Sustainable Development*, 34(1), 155–173 (2013). <https://doi.org/10.1007/s13593-013-0152-y>
- Smith, S.E. y Smith, F.A. (2011). Roles of arbuscular mycorrhizas in plant nutrition and growth: new paradigms from cellular to ecosystem scales. *Annual Review of Plant Biology* 62, 227–250. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042110-103846>
- Sinha, S., Mishra, R.K., Sinam, G. y Mallick, S. (2013). Comparative evaluation of metal phytoremediation potential of trees, grasses, and flowering plants from Tannery-wastewater-contaminated soil in relation with physicochemical properties. *Journal Soil. Contamination.* 22, 958–983. <https://doi.org/10.1080/15320383.2013.770437>.
- Song, N., Wang, F., Ma, Y. y Tang, S. (2015). Using DGT to assess cadmium bioavailability to ryegrass as influenced by soil properties. *Pedosphere* 25, 825e833. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(15\)30063-1](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(15)30063-1)
- Symanczik, S., Lehmann, M.F., Wiemken, A., Boller, T. y Courty, P.E. (2018). Effects of two contrasted arbuscular mycorrhizal fungal isolates on nutrient uptake by *Sorghum bicolor* under drought. *Mycorrhiza*, 28, 779–785. <https://doi.org/10.1007/s00572-018-0853-9>
- Tajudin, S.A., Azmi, M.A. y Nabila, A.T. (2016). Stabilization/Solidification Remediation Method for Contaminated Soil: A Review, *Materials Science and Engineering*, 136, 1-6 <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/136/1/012043>

- Tan S-Y, Jiang Q-Y, Zhuo F, Liu H, Wang Y-T, Li S-S., Zhi-Hong, Y. y Yuan-Xiao, J. (2015) Effect of Inoculation with *Glomus versiforme* on Cadmium Accumulation, Antioxidant Activities and Phytochelatins of *Solanum photeinocarpum*. PLoS ONE 10(7), e0132347. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0132347>
- Thévenod F. y Lee W.K. (2013) Toxicology of Cadmium and Its Damage to Mammalian Organs. In: Sigel A., Sigel H., Sigel R. (eds) *Cadmium: From Toxicity to Essentiality*. 11. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-007-5179-8_14
- Torres, N., Antolín, M. C. y Goicoechea, N. (2018). Arbuscular mycorrhizal symbiosis as a promising resource for improving berry quality in grapevines under changing environments. *Frontiers in Plant Science*, 9, 897. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00897>
- Vallejos-Torres, G., Ruíz-Valles, R., Chappa-Santa María, C. E., Gaona-Jiménez, N. y Marín, C. (2022). High genetic diversity in arbuscular mycorrhizal fungi influence cadmium uptake and growth of cocoa plants. *Bioagro*, 34(1), 75-84. <https://doi.org/10.51372/bioagro341.7>
- Vallejos-Torres, G., Espinoza, E., Marín-Díaz, J. Solis, R. y Arévalo, L. (2021). The Role of Arbuscular Mycorrhizal Fungi Against Root-Knot Nematode Infections in Coffee Plants. *Journal Soil Science Plant Nutrition*, 21, 364–373. <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00366-z>
- Wang Y., Huang J. y Gao Y. (2012). Arbuscular mycorrhizal colonization alters subcellular distribution and chemical forms of cadmium in *Medicago sativa* L. and resists cadmium toxicity. *Plos One*, 7, e48669. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0048669>
- Wang, J., Yuan, J., Yang, Z., Huang, B., Zhou, Y., Xin, J. y Yu, H. (2009). Variation in cadmium accumulation among 30 cultivars and cadmium subcellular distribution in 2 selected cultivars of water spinach (*Ipomoea aquatica* Forsk). *Journal of agricultural and food chemistry*, 57(19), 8942-8949. <https://doi.org/10.1021/jf900812s>
- Wang, A. S., Angle, J. S., Chaney, R. L., Delorme, T. A. y Reeves, R. D. (2006). Soil pH Effects on Uptake of Cd and Zn by *Thlaspi caerulescens*. *Plant Soil*. 281, 325–337. <https://doi.org/10.1007/s11104-005-4642-9>

- Weissenhorn, I., Leyval, C. y Berthelin, J. (1993). Cd-tolerant arbuscular mycorrhizal (AM) fungi from heavy-metal polluted soils. *Plant Soil*, 157(2), 247– 256. <https://www.jstor.org/stable/42939065>
- White, P.J. y Brown, P.H., (2010). Plant nutrition for sustainable development and global health. *Annals of Botany* 105, 1073-1080. <https://doi.org/10.1093/aob/mcq085>
- Wickramasuriya, A.M. y Dunwell, J.M. (2018). Biotecnología del cacao: estado actual y perspectivas futuras. *Revista de biotecnología vegetal*, 16 (1), 4-17. <https://doi.org/10.1111/pbi.12848>
- Wipf, D., Krajinski, F., van Tuinen, D., Recorbet, G. y Courty, P. E. (2019). Trading on the arbuscular mycorrhiza market: from arbuscules to common mycorrhizal networks. *New Phytologist*, 223(3), 1127-1142. <https://doi.org/10.1111/nph.15775>
- Yang, Z., Wu, Z., Liao, Y., Liao, Q., Yang, W. y Chai, L. (2017). Combination of microbial oxidation and biogenic schwertmannite immobilization: A potential remediation for highly arsenic-contaminated soil. *Chemosphere*. 181, 1-8. <https://booksc.eu/book/64836827/4442b3>
- Yasir, H., Lin, T., Muhammad, I.S., Xuerui, C., Bilal, H., Muhammad, Z.A., Muhammad, U., Zhen-li, H. y Xiaoe, Y. (2019). An explanation of soil amendments to reduce cadmium phytoavailability and transfer to food chain. *Sci. Total. Environment*. 660, 80–96. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.419>
- Zeng, X., Wu, L., Li, W., Zhu, S., Wei, B., Tang, J. y Tan, Y. (2017). Characterization of strain cupriavidus sp. zsk and its biosorption of heavy metal ions. *Journal Biobased Mater. Bio*. 11, 154–158. <https://dx.doi.org/10.1166/jbmb.2017.1649>.
- Zhang, Y., Hu, J., Bai, J., Wang, J., Yin, R., Wang, J. y Lin, X. (2018). Arbuscular mycorrhizal fungi alleviate the heavy metal toxicity on sunflower (*Helianthus annuus* L.) plants cultivated on a heavily contaminated field soil at a WEEE-recycling site. *Science of The Total Environment*, 628, 282-290. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.331>
- Zhang, F., Liu, M., Li, Y., Che, Y. y Xiao, Y. (2019). Effects of arbuscular mycorrhizal fungi, biochar and cadmium on the yield and element uptake of *Medicago sativa*. *Science of The Total Environment*, 655, 1150-1158. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.317>

- Zhang, X., Chen, B. y Ohtomo, R. (2015). Mycorrhizal effects on growth, P uptake and Cd tolerance of the host plant vary among different AM fungal species, *Soil Science and Plant Nutrition*, 61(2), 359-368. <https://doi.org/10.1080/00380768.2014.985578>
- Zhong, M.S., Jiang, L., Han, D., Tian-Xiang, X., Jue-Jun, Y., Xiao-Yang, J. y Peng, Ch. (2015). Cadmium exposure via diet and its implication on the derivation of health-based soil screening values in China. *J Expo Sci Environ Epidemiol* 25, 433–442 <https://doi.org/10.1038/jes.2015.5>
- Zug, K.L.M., Huamaní-Yupanqui, H.A., Meyberg, F., Cierjacks, J.S. y Cierjacks, A. (2019). Cadmium Accumulation in Peruvian Cacao (*Theobroma cacao* L.) and Opportunities for Mitigation”. *Water Air Soil Pollut* 230, 72. <https://doi.org/10.1007/s11270-019-4109-x>

TERMINOLOGÍA

Absorción de cadmio. Proceso atribuible a la capacidad de retención del metal en cuestión por el suelo, al cultivo, a la interacción planta-raíz-metal y al metabolismo vegetal propio (Prieto *et al.*, 2009).

Cloruro de cadmio (CdCl₂). Este elemento es considerado como una sustancia teratogénica empleada en la industrialización. Sin embargo, es más reconocido por su efecto de toxicidad en el organismo (Deveci y Deveci, 2011).

Compost. Es una degradación de restos orgánicos, generados mediante la descomposición en condiciones aeróbicas, cuyo objetivo es aplicar a suelos infértiles o de bajo contenido de nutrientes para mejorar la fertilidad y estado nutricional de los suelos (Román, 2013).

Consortio micorrízico. Un consorcio micorrízico hace referencia a una diversidad de especies de hongos micorrízicos arbusculares presente en un determinado inóculo (Del Águila *et al.*, 2018).

Enmienda orgánica. Son aquellas materias orgánicas generados a partir de restos de origen vegetal, origen animal o una mezcla de estas, tratadas en camas de preparación con aplicación de microorganismos eficientes; buscando mejorar directamente las características fisicoquímicas del suelo como MO materia orgánica”, densidad aparente y CIC (Castelo-Gutiérrez *et al.*, 2016).

HMA. (Hongos micorrízicos arbusculares). Son microorganismos simbioses y están presentes en el suelo y se cree que están asociados a un 80 % de plantas, por colonización en raíces de vegetales. Esta asociación micorrízica entre el hongo y planta, es capaz de explorar mayor área de suelo como prolongaciones y complementos del sistema radicular (Barrera, 2009).

Inoculación con HMA. Proceso por el cual consiste en poner en contacto el hongo micorrízico arbusculares con el sistema radicular de la planta (Del Águila *et al.*, 2018).

Inmovilización. Se sustenta en la retención soluble de los metales pesados, reduciendo el contenido severamente, lo que reduce su posible translocación hacia los vegetales, microorganismos y aguas (Tajudin *et al.*, 2016).

Inóculo. Término colectivo para referirse a los microorganismos o sus partes (esporas, fragmentos miceliales, etc.) capaces de provocar infección o simbiosis cuando se transfieren a un huésped (Arévalo *et al.*, 2021).

Metales pesados. Los metales pesados están definidos como elementos con un peso específico igual o superior a 5 g cm^{-3} (Khan, 2015). Estos elementos tienen su origen en causas naturales y como consecuencia de actividades antropogénicas tales como los desechos industriales, emisión de gases de los automóviles y las prácticas agronómicas (Aikpokpodion *et al.*, 2012).

Planta del cacao. Es un árbol que se reproduce en bosques tropicales húmedos, lo cual restringe su origen a ciertas áreas del planeta. En la América tropical, específicamente América del Sur, existe una amplia diversidad del género *Theobroma* (Leal *et al.*, 2000).

Suelo Contaminado. Se refiere a aquellos suelos cuyas características se han visto afectadas en su composición fisicoquímica y biológica, en ciertas proporciones constituye un riesgo tanto para la salud humana y medio ambiente (García, 2012).

APÉNDICES

Apéndice 1. Análisis físico y químico del compost empleado en el estudio



INSTITUTO DE CULTIVOS TROPICALES

INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN AGRÍCOLA PARA EL DESARROLLO DE LA AMAZONÍA PERUANA

CERTIFICADO INDECOPI N° 00072183

LABORATORIO DE ANÁLISIS DE SUELOS, PLANTAS, AGUAS, FERTILIZANTES Y ALIMENTOS

REPORTE DE ANÁLISIS DE SUELOS - CARACTERIZACIÓN

N° SOLICITUD : AS0360-21
 SOLICITANTE : UNIVERSIDAD CATOLICA SEDES SAPIENTIAI
 PROCEDENCIA : SAN MARTIN - LAMAS - RUMIZAPA
 CULTIVO : CACAO

FECHA DE MUESTREO : 20/11/2021
 FECHA DE RECEP. LAB : 14/12/2021
 FECHA DE REPORTE : 18/12/2021

Item	Número de la muestra				pH	C.E.	CaCO ₃	M.O.	N	P	K	CIC	CICef	Ca	Mg	K	Na	Al ³⁺	Suma de Bases	Saturación de Bases	Saturación de Al ³⁺	ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO			CLASE TEXTURAL
	Lab.	Campo				dS/cm	%	%	%	ppm	ppm	cmolc/kg							cmolc/kg	%	%	ARENA %	LIMO %	ARCILLA %	
01	21	12	2435	CET-2021	7.98	0.30	8.80	5.53	0.28	318.00	740.00	17.99	17.99	12.96	3.04	1.89	0.10	0.00	17.99	100.00	0.00	69.52	11.28	19.20	Fra-Are

MÉTODOS:	
TEXTURA:	HIDROMETRO
pH	POTENCIOMETRO SUSPENSIÓN SUELO-AGUA RELACIÓN 1:2.5
CONDUC. ELÉCTRICA	CONDUCTIMETRO SUSPENSIÓN SUELO-AGUA 1:2.5
CARBONATOS	GAS - VOLUMÉTRICO
FOSFORO DISPONIBLE	OLSEN MODIFICADO EXTRACT. NaHCO ₃ 40 mM, pH 8.5 Eto/ Vis (144)CH ₃ -COOH-N, pH 7. Absorción Atómica
POTASIO Y SODIO INTERCAMBIABLE	WALKLEY y BLACK
MATERIA ORGÁNICA	EXTRACT. KCHO ₃ 1N (1M)HClO ₄ -COOH-N, pH 7. Absorción Atómica
CALCIO Y MAGNESIO INTERCAMBIABLE	EXTRACT. KCl 1N, VOLUMÉTRICO
ACIDEZ INTERC.	WOODRUFF MODIFICADO
ACIDEZ POTENCIAL	ACIDEZ POTENCIAL-SUMA DE BASES
CIC pH 7.0	DTPA método 0.005M, pH 7.3, Absorción Atómica
Fe, Cu, Zn y Mn	Extracción / Espectrometría UV-Vis (14420 nm) con Azobmetina-H
BORO	Extracción / Turbidimetría (14420 nm)
AZUFRE	EPA 3050B
METALES PESADOS	

La Banda de Shilcayo, 18 de Diciembre del 2021

INSTITUTO DE CULTIVOS TROPICALES
TARAPOTO - PERÚ
Cesar O. Areyálo Hernández, MSc
JEFE DE DPTO. DE SUELOS

Nota: El laboratorio no se responsabiliza por la metodología aplicada para la toma de la muestra del presente reporte.

Apéndice 2. Análisis físico y químico de los sustratos.



INSTITUTO DE CULTIVOS TROPICALES

INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN AGRÍCOLA PARA EL DESARROLLO DE LA AMAZONÍA PERUANA

CERTIFICADO INDECOPI N° 00072183

LABORATORIO DE ANÁLISIS DE SUELOS, PLANTAS, AGUAS, FERTILIZANTES Y ALIMENTOS

REPORTE DE ANÁLISIS DE SUELOS - CARACTERIZACIÓN

N° SOLICITUD : AS0019- 21
 SOLICITANTE : UNIVERSIDAD CATOLICA SEDES SAPIENTIAE
 PROCEDENCIA : VIVERO - UNSM
 CULTIVO : CACAO

FECHA DE MUESTREO : 06/12/2021
 FECHA DE RECEP. LAB : 09/12/2021
 FECHA DE REPORTE : 15/12/2021

Item	Número de la muestra				pH	C.E dS/m	CaCO ₃ (%)	M.O (%)	N (%)	P (ppm)	K (ppm)	ANÁLISIS MECÁNICO			CIC pH 7.0	CATIONES CAMBIABLES					Suma de bases	% Sat. de bases	% Sat. de Al ³⁺	
	Lab.		Campo									Arena	Limo	Arcilla		CLASE TEXTURAL	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺				Al ³⁺ +H ⁺
												%	%	%										
01	21	01	0087	T1	6.52	0.10	<0.3	0.99	0.045	5.40	46	79.24	7.56	13.20	Fra-Are	5.49	4.67	0.60	0.12	0.10	0.00	5.5	100.0	0.0
02	21	01	0088	T2	6.81	0.11	<0.3	1.48	0.066	7.00	31	79.24	7.56	13.20	Fra-Are	5.59	4.84	0.58	0.08	0.10	0.00	5.6	100.0	0.0
03	21	01	0089	T5	7.01	0.09	<0.3	1.22	0.055	4.80	34	79.24	7.56	13.20	Fra-Are	6.13	5.31	0.62	0.09	0.11	0.00	6.1	100.0	0.0
04	21	01	0090	T6	7.16	0.10	<0.3	1.43	0.065	7.60	40	79.24	7.56	13.20	Fra-Are	6.68	5.78	0.68	0.10	0.12	0.00	6.7	100.0	0.0
05	21	01	0091	T9	7.30	0.08	<0.3	1.30	0.059	5.60	28	79.24	7.56	13.20	Fra-Are	6.04	5.27	0.60	0.07	0.10	0.00	6.0	100.0	0.0
06	21	01	0092	T10	7.38	0.12	<0.3	1.37	0.062	6.40	28	79.24	7.56	13.20	Fra-Are	6.23	5.44	0.62	0.07	0.10	0.00	6.2	100.0	0.0
07	21	01	0093	T13	7.43	0.09	<0.3	1.05	0.047	5.00	27	79.24	7.56	13.20	Fra-Are	5.28	4.58	0.52	0.07	0.11	0.00	5.3	100.0	0.0
08	21	01	0094	T14	7.53	0.13	<0.3	1.25	0.056	6.40	37	79.24	7.56	13.20	Fra-Are	6.24	5.45	0.60	0.09	0.09	0.00	6.2	100.0	0.0

MÉTODOS :	
TEXTURA	HEROMETRO
pH	POTENCIOMETRO SUSPENSION SUELO-AGUA RELACION 1:2.5
CONDUCT. ELECTRICA	CONDUCTOMETRO SUSPENSION SUELO-AGUA 1:2.5
CARBONATOS	GAS - VOLUMETRICO
FOSFORO DISPONIBLE	OLSEN MODIFICADO EXTRACT. NaHCO ₃ 0.5M, pH 8.5 Exp. Vis.
POTASIO Y SODIO INTERCAMBIABLE	(NH ₄) ₂ CO ₃ -COOH+IN. pH 7. Absorcion Atomica
MATERIA ORGANICA	WALKLEY y BLACK
CALCIO Y MAGNESIO INTERCAMBIABLE	EXTRACT. KCl+IN 0 (NH ₄) ₂ CO ₃ -COOH+IN. pH 7. Absorcion Atomica
ACIDEZ INTERC.	EXTRACT. KCl IN VOLUMETRIA
ACIDEZ POTENCIAL	WOODRUFF MODIFICADO
CIC pH 7.0	ACIDEZ POTENCIAL+SUMA DE BASES
Fe, Cu, Zn y Mn	OLSEN Modificado extract. NaHCO ₃ 0.5M, pH 8.5 Absorcion Atomica
BORO	Espectrometria UV-Vis (λ=555 nm)
ALUMINE	Espectrometria UV-Vis (λ=420 nm)
METALES PESADOS	ETA-3000B

INSTITUTO DE CULTIVOS TROPICALES
 TARAPOTO - PERU
 Cesar O. Arévalo Hernández, MSc
 JEFE DE DPTO. DE SUELOS

Nota: El laboratorio no se responsabiliza por la metodología aplicada para la toma de la muestra del presente reporte.

Activar Wi
 Ve a Configura

Apéndice 3. Análisis de cadmio en suelos de plántones de cacao



INSTITUTO DE CULTIVOS TROPICALES

INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN AGRÍCOLA PARA EL DESARROLLO DE LA AMAZONÍA PERUANA

CERTIFICADO INDECOPI N° 00072183

LABORATORIO DE ANÁLISIS DE SUELOS, PLANTAS, AGUAS, FERTILIZANTES Y ALIMENTOS

REPORTE DE ANÁLISIS DE SUELOS - CADMIO

N° SOLICITUD : AS0020-01-21
 SOLICITANTE : UNIVERSIDAD CATOLICA SEDES SAPIENTIAE
 PROCEDENCIA : VIVERO - UNSM
 CULTIVO : CACAO

FECHA DE MUESTREO : 06/12/2021
 FECHA DE RECEP. LAB : 09/12/2021
 FECHA DE REPORTE : 15/12/2021

Item	Número de la muestra				Cd (ppm)
	Lab.		Campo		
01	21	01	0095	T1-M1	0.31
02	21	01	0096	T1-M2	0.29
03	21	01	0097	T1-M3	0.42
04	21	01	0098	T2-M1	1.30
05	21	01	0099	T2-M2	1.22
06	21	01	0100	T2-M3	1.28
07	21	01	0101	T5-M1	0.38
08	21	01	0102	T5-M2	0.38
09	21	01	0103	T5-M3	0.53

MÉTODOS :
 CADMIO : EPA 3050B

Nota: El laboratorio no se responsabiliza por la metodología aplicada para la toma de la muestra del presente reporte.

INSTITUTO DE CULTIVOS TROPICALES
 TARIAPATO - PERÚ
 Cesar O. Prevalo Hernández, MSc
 JEFE DE DPTO. DE SUELOS

Apéndice 4. Análisis de cadmio en raíces de plántones de cacao



INSTITUTO DE CULTIVOS TROPICALES

INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN AGRÍCOLA PARA EL DESARROLLO DE LA AMAZONÍA PERUANA

CERTIFICADO INDECOPI N° 00072183

LABORATORIO DE ANÁLISIS DE SUELOS, PLANTAS, AGUAS, FERTILIZANTES Y ALIMENTOS

REPORTE DE ANÁLISIS FOLIAR - CADMIO

N° SOLICITUD : AF0001-04-21
 SOLICITANTE : UNIVERSIDAD CATOLICA SEDES SAPIENTIAE
 PROCEDENCIA : VIVERO - UNSM
 TEJIDO VEGETAL : RAIZ DE PLANTON DE CACAO

FECHA DE MUESTREO : 06/12/2021
 FECHA DE RECEP. LAB : 09/12/2021
 FECHA DE REPORTE : 15/12/2021

ITEM	Número de Muestra			CADMIO ppm	
	Laboratorio		Campo		
01	21	01	0025	T1-M1	6.40
02	21	01	0026	T1-M2	4.23
03	21	01	0027	T1-M3	4.66
04	21	01	0028	T2-M1	16.80
05	21	01	0029	T2-M2	18.62
06	21	01	0030	T2-M3	17.77
07	21	01	0031	T5-M1	2.43
08	21	01	0032	T5-M2	24.65
09	21	01	0033	T5-M3	2.61
10	21	01	0034	T6-M1	12.58

METODOLOGIA:

CADMIO : Digestion HNO3 / Espectr. Absorción Atómica

Nota: el laboratorio no se responsabiliza por la metodología aplicada para la toma de la muestra del presente reporte.
 *Los Calculos estan en base a materia seca.

INSTITUTO DE CULTIVOS TROPICALES
 TARAMA, PERU
 Cesar O. Arévalo Hernández, MSc
 JEFE DE DPTO. DE SUELOS

Apéndice 5. Análisis de cadmio en tallos de plántones de cacao



INSTITUTO DE CULTIVOS TROPICALES

INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN AGRÍCOLA PARA EL DESARROLLO DE LA AMAZONÍA PERUANA

CERTIFICADO INDECOPI N° 00072183

LABORATORIO DE ANÁLISIS DE SUELOS, PLANTAS, AGUAS, FERTILIZANTES Y ALIMENTOS

REPORTE DE ANÁLISIS FOLIAR - CADMIO

N° SOLICITUD : AF0001-01-21
 SOLICITANTE : UNIVERSIDAD CATOLICA SEDES SAPIENTIAE
 PROCEDENCIA : VIVERO - UNSM
 TEJIDO VEGETAL : TALLO DE PLANTON DE CACAO

FECHA DE MUESTREO : 06/12/2021
 FECHA DE RECEP. LAB : 09/12/2021
 FECHA DE REPORTE : 15/12/2021

ITEM	Número de Muestra			CAMPIO	
	Laboratorio		Campo		ppm
01	21	01	0001	T1-M1	2.00
02	21	01	0002	T1-M2	1.87
03	21	01	0003	T1-M3	1.81
04	21	01	0004	T2-M1	28.24
05	21	01	0005	T2-M2	29.33
06	21	01	0006	T2-M3	30.37
07	21	01	0007	T5-M1	1.98
08	21	01	0008	T5-M2	1.52
09	21	01	0009	T5-M3	3.45
10	21	01	0010	T6-M1	28.09

METODOLOGIA:
 CADMIO : Digestion HNO3 / Espectr. Absorción Atómica

Nota: el laboratorio no se responsabiliza por la metodología aplicada para la toma de la muestra del presente reporte.
 *Los Calculos estan en base a materia seca.

INSTITUTO DE CULTIVOS TROPICALES
 TARIAPOTO - PERU

Cesar O. Arevalo Hernández, MSc
 JEFE DE OPTO. DE SUELOS

Apéndice 6. Promedio de datos del contenido de cadmio en suelos, raíces y tallos

N°	Tratamientos	Cadmio en suelos (mg.kg⁻¹)	Cadmio en raíces (mg.kg⁻¹)	Cadmio en tallos (mg.kg⁻¹)
1	Sin HMA, Cd y Compost	0,34	5,1	1,89
2	HMA	0,43	9,9	1,75
3	Compost	0,69	1,36	1,75
4	HMA x Compost	0,35	5,94	1,04
5	Cd	1,27	17,79	29,31
6	HMA x Cd	1,34	13,95	28,72
7	Cd x Compost	1,38	21,61	29,77
8	HMA x Cd x Compost	1,17	18,3	22,34