

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE ALTO AMAZONAS

FACULTAD DE INGENIERIA Y CIENCIAS

Escuela profesional de Ingeniería Agrónoma



TESIS

Concentración de cadmio en suelo y hojas de tres genotipos de cacao orgánico (*Theobroma cacao*) en Yurimaguas

Para optar el título profesional de Ingeniero Agrónomo

PRESENTADO POR:

Adler López Rengifo

(ORCID:0009-0006-9934-578X)

ASESOR:

Dr. Enrique Arévalo Gardini

(ORCID:0000-0002-1725-6788)

Yurimaguas –Perú

2026

MDJ-02. DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Dr. Enrique Arévalo Gardini de la Facultad de Ingeniería, Programa de Estudios de Agronomía, de la Universidad Nacional Autónoma de Alto Amazonas.

DECLARO:

Que el presente informe de investigación titulado: “Concentración de cadmio en suelo y hojas de tres genotipos de cacao orgánico (*Theobroma cacao*) en Yurimaguas.”, constituye la memoria que presenta el Bachiller Adler López Rengifo para aspirar al título de Profesional de Ingeniero Agrónomo, Ha sido realizado en la Universidad Nacional Autónoma de Alto Amazonas bajo mi dirección.

Las opiniones y declaraciones en este informe son de entera responsabilidad del autor, sin comprometer a la institución.

Y estando de acuerdo, firmo la presente constancia en Yurimaguas, a los 03 Días del mes de marzo del año 2026.



Dr. Enrique Arévalo Gardini
Asesor

Concentración de cadmio en suelo y hojas de tres genotipos de cacao orgánico (*Theobroma cacao*) en Yurimaguas,

Yurimaguas 2026

TESIS

Presentada para optar el título profesional de Ingeniero Agrónomo

JURADO CALIFICADOR



Dr. Luis Alberto Arévalo
López
Presidente



Dra. Magaly Alejandra
Brousett Minaya
Miembro



Dr. Hipólito Marga Orrillo
Miembro



Dr. Enrique Arévalo Gardini
Asesor

Yurimaguas, 03 de marzo del 2026

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE ALTO AMAZONAS

FACULTAD DE INGENIERIA Y CIENCIAS

Escuela profesional de Ingeniería Agrónoma

TESIS

Concentración de cadmio en suelo y hojas de tres genotipos de cacao
orgánico (*Theobroma cacao*) en Yurimaguas

Para optar el título profesional de Ingeniero Agrónomo

PRESENTADO POR:

Adler López Rengifo.

ASESOR:

Dr. Enrique Arévalo Gardini

Yurimaguas – Perú

2026

DEDICATORIA

A mi madre Nélida Rengifo Pinedo por el apoyo moral y la confianza depositada en mí, para que de esta manera pueda auto realizarme como profesional.

A mi querida esposa Angelica Paula Márquez Mori e hija Valery Rousey López Márquez, por ser mi apoyo incondicional. A todos ustedes con amor.

AGRADECIMIENTO

Gracias a Dios por brindarme la dicha de la vida y por acompañarme en cada instante; protéjanos y otórgame vigor para continuar al frente.

A la Universidad Nacional Autónoma de Alto Amazonas, por el respaldo académico que me ha brindado a lo largo de mi trayectoria.

A la Facultad de Ingeniería y Ciencia, en particular a la Escuela Profesional de Ingeniería Agronómica, por la oportunidad de realizar esta investigación y por el apoyo que me han brindado en cada etapa.

A mi asesor al PhD. Enrique Arévalo Gardini, y coasesor Dr. César Oswaldo Arévalo Hernández por brindarme su confianza y la posibilidad de desarrollar el presente trabajo investigativo, en todas sus enseñanzas durante el tiempo del proyecto.

A mis jurados Dr. Luis Alberto Arévalo López, Dra. Magaly Alejandra Brousett Minaya, y al Dr. Hipolito Murga Orrillo, por su tiempo y dedicación al evaluar y recomendar mejoras en mi tesis.

A mis honorables padres al iluminarme con la vida y por enseñarme a vivirla y, por último, a quienes no puedo dejar de recordarlos y no por ser menos importante a todos mis familiares y amigos.

RESUMEN

El cacao es un cultivo de importancia en el Perú; sin embargo, en los últimos años se ha verificado la presencia de cadmio (Cd) en los diferentes órganos de este cultivo. Se tuvo por objetivo analizar el Cd en el suelo y su acumulación en hojas de los genotipos CCN 51, ICS 95 y un híbrido de cacao. En este sentido, se realizó un estudio exploratorio no experimental, donde tres plantas de cacao representaban una unidad experimental, con tres repeticiones, haciendo 9 plantas por genotipo, totalizando 27 plantas evaluadas. Se realizaron análisis de suelo y análisis foliar. En el suelo el Cd no hubo diferencia significativa; sin embargo, en las hojas presenta diferencias significativas ($p < 0,01$) con mayor media en el genotipo CCN 51 al comparar con los ICS95 e Híbrido. Presento correlación muy fuerte ($r_s = 0,72$) entre el Cd del suelo y el Cd de la hoja, indicando que existe translocación desde Cd del suelo a los órganos de la planta. También, presento correlación negativa muy fuerte del Cd con el CaCO_3 y ($r_s = -0,85$), con el N ($r_s = -0,84$) y con la saturación de bases ($r_s = -0,83$), indicando que afecta la absorción de nutrientes.

PALABRAS CLAVE: Contaminación, híbrido, absorción, bioacumulacion, metales pesados.

ABSTRACT

Cocoa is an important in Peru; however, in recent years the presence of cadmium(Cd) has been detected in different parts of this crop. The objective was to analyze Cd in the soil and its accumulation in the leaves of the CCN 51, ICS 95 genotypes, and a cocoa hybrid. In this regard, a non-experimental exploratory study was carried out, where three cocoa plants represented an experimental unit, with three repetitions, making 9 plants per genotype, totaling 27 plants evaluated. Soil and foliar analyses were carried out. In the soil, there was no significant difference in Cd; however, in the leaves, there were significant differences ($p < 0.01$) with a higher mean in the CCN51 genotype compared to ICS 95 and hybrid. A very strong correlation was observed. ($r_s = 0.72$) between soil Cd and leaf Cd, indicating that there is translocation from soil Cd to the plant organs. Also, a very strong negative correlation was observed between Cd and CaCO_3 ($r_s = -0.85$), with N ($r_s = -0.84$), and with base saturation ($r_s = -0.83$), indicating that it affects nutrient absorption.

KEY WORDS: Contamination, Hybrid, Absorption, Bioaccumulation, Heavy metals

INTRODUCCIÓN

El cultivo de cacao (*Theobroma cacao L.*) es un componente estratégico de la cultura en América tropical, ya que desempeña un papel clave en las economías rurales como en la construcción y expresión de la identidad cultural de distintas regiones.

El Perú se ha posicionado en uno de los mayores productores y exportadores de cacao orgánico a nivel global, destacando por la calidad y trazabilidad de su producción (Meléndez-Mori et al., 2023; Broncano-Seminario et al., 2024). Sin embargo, en zonas cacaoteras de América Latina, incluyendo el Perú, se ha evidenciado la acumulación de (Cd) y otros metales pesados en suelos agrícolas, ya sea por origen geogénico o por actividades antrópicas. Estos elementos pueden ser absorbidos por las raíces del cacao, movilizados a través del xilema y depositados en las almendras (Gramlich et al., 2018; Scaccabarozzi et al., 2020), representando un riesgo para la salud humana al superar los valores máximos permitidos por organismos regulatorios internacionales, entre ellas la *Codex Alimentarius Commission* (2016).

Este escenario plantea un desafío crítico para la industria cacaotera, que requiere estrategias de manejo agronómico y genético orientadas a disminuir la acumulación de (Cd) en las distintas etapas de la cadena productiva del cacao.

El Cd es un metal tóxico, que se localiza en el suelo en concentraciones relativamente bajas; no obstante, puede aumentar sus concentraciones por acciones humanas, como la minería, la aplicación de fertilizantes fosfatados y la contaminación industrial (García et al., 2025).

La provincia de Alto Amazonas, ubicada en la Amazonía peruana, se destaca por la producción de cacao orgánico, reconocido por sus características de calidad y sostenibilidad (Hidalgo, 2017; Tuesta et al., 2024) . Sin embargo, las investigaciones de la existencia de Cd en los suelos y tejidos de cacao en este ámbito son limitadas, lo que plantea la exigencia de desarrollar un estudio sobre la concentración en diferentes genotipos de cacao cultivados en esta región (Arévalo-Gardini et al., 2017). Estos estudios son importantes para comprender la dinámica de asimilación de Cd en el cultivo de cacao, especialmente en plantaciones orgánicas, donde el manejo de fertilizantes y pesticidas está restringido y sujeto al estado natural del suelo.

La concentración de Cd en el cacao varía según el genotipo de la planta, lo que sugiere que ciertos genotipos pueden tener una mayor capacidad para acumular este metal pesado que otros. Esta variabilidad genotípica es un factor clave a considerar en la selección de cultivos más resistentes a la acumulación de Cd (Arévalo-Hernández et al., 2021). De esta manera, un análisis detallado de los factores que afectan la acumulación de Cd en el cacao podría contribuir a la identificación de genotipos más adecuados para la producción sostenible en áreas perjudicadas por la contaminación de metales pesados. Se encuentran cuatro variedades genéticas naturales y una híbrido: el Criollo es una variedad semisilvestre; el Forastero procede del Bajo Amazonas y el Forastero original del Alto Amazonas, que sobresale el 90 % de la producción mundial y un quinto grupo genético es el Trinitario (García, 2009).

De los distintos factores que influyen en la acumulación de Cd, es importante considerar que no actúan de manera aislada, sino que interactúan entre sí y condicionan el nivel de concentración final.

Los resultados de este estudio podrán aportar al desarrollo de mejores prácticas agrícolas en la producción de cacao orgánico, promoviendo cultivos más saludables y sostenibles, con una

menor acumulación de metales pesados. Por consiguiente, se espera que este análisis permita a los productores de Yurimaguas adoptar estrategias más eficientes en la preferencia de genotipos de cacao, minimizando riesgos de contaminación y mejorando la capacidad del cacao peruano en mercados internacionales. A medida que la investigación sobre los impactos del Cd en los cultivos cacaoteros avance, se podrán establecer directrices claras para reducir la exposición de este metal en productos alimentarios y garantizar la seguridad y calidad del cacao en todo su ciclo productivo.

Por las razones ya mencionadas, esta investigación se desarrolló con el propósito de evaluar la concentración de Cd en 3 genotipos cultivados orgánicamente: CCN 51, ICS95 y un híbrido espontáneo.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA	I
AGRADECIMIENTO.....	II
RESUMEN.....	III
ABSTRACT.....	IV
INTRODUCCIÓN	V
ÍNDICE GENERAL.....	VIII
ÍNDICE DE TABLAS	X
ÍNDICE DE FIGURAS.....	<u>XII</u>
ÍNDICE DE ANEXOS	<u>XIII</u>
CAPÍTULO I. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	14
1.1 IDENTIFICACIÓN Y DETERMINACIÓN DEL PROBLEMA	14
1.2 DELIMITACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	16
1.3 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	17
1.4 FORMULACIÓN DE OBJETIVOS.....	18
1.5 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	18
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	20
2.1. ANTECEDENTES DE ESTUDIO.....	20
2.2. BASES TEÓRICAS CIENTÍFICAS	22
2.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS	33
2.4. FORMULACIÓN DE HIPÓTESIS.....	34
2.5. IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES.....	35
2.6 OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES.....	36
CAPÍTULO III. METODOLOGÍA Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN	37
3.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN	37
3.2. NIVEL DE INVESTIGACIÓN.....	37
3.3. MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN	37
3.4. DISEÑO DE INVESTIGACIÓN.....	40
3.5. POBLACIÓN Y MUESTRA	41
3.6. TÉCNICAS E INSTRUMENTO DE RECOLECCIÓN DE DATOS.....	41
3.7. SELECCIÓN, VALIDACIÓN DE LOS INSTRUMENTOS DE INVESTIGACIÓN	43

3.8. TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS	44
3.9. ORIENTACIÓN ÉTICA, EPISTEMOLÓGICA Y FILOSÓFICA	45
CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES	46
4.1 PRESENTACIÓN, ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	46
4.2 DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	53
CONCLUSIONES	63
RECOMENDACIONES.....	65
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	67
ANEXO.....	82

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Operacionalización de variables	36
Tabla 2. Resultados del análisis fisicoquímico de las muestras de suelo.	47
Tabla 3. Prueba de Kruskal Wallis para la concentración de Cd en suelo de tres genotipos de cacao orgánico.	48
Tabla 4. Prueba de medianas por Kruskal Wallis para la concentración de Cd en hojas de tres genotipos de cacao orgánico.	49
Tabla 5. Coeficiente de correlación de Spearman la concentración de en el suelo y las hojas con los factores que se relacionan en los tres genotipos de cacao orgánico.	51

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación geopolítica del distrito de Yurimaguas/provincia de Alto Amazonas/Loreto.	40
Figura 2. Diseño de la instalación del trabajo de investigación en campo.	41
Figura 3. Intervalos de confianza al 95% (IC:95) de la concentración de Cd en las hojas de tres genotipos de cacao orgánico	50

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 01 Codificación de las plantas de cacao según genotipo.	82
Anexo 02 Proceso de muestreo de suelo con barreno en plantación de cacao para determinar la concentración de cadmio.	83
Anexo 03. Muestreo foliar de cacao para la determinación de Cd.	84
Anexo 04. Resultados del análisis de Cd en muestras de suelo por genotipo.	85
Anexo 05. Resultados de análisis de Cd en tejido foliar de los genotipos de cacao.	85
Anexo 6. Resultados de caracterización física y química de suelo en los genotipos evaluados.	85
Anexo 7. Certificado emitido por SENASA San Martín que acredita la condición de cacao orgánico	86
Anexo 08. Resultados de análisis de suelo en el laboratorio instituto de cultivos tropicales.	87
Anexo 09. Resultados de análisis foliar en el laboratorio instituto de cultivos tropicales.	90
Anexo 10. Resultados de análisis de caracterización física y química de suelo en los laboratorios instituto de cultivos tropicales.	93

CAPÍTULO I. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. Identificación y determinación del problema

En los últimos años, la presencia de metales pesados en suelos agrícolas ha generado un interés creciente en el ámbito científico y productivo, debido a los efectos que pueden tener en la salud humana, en la seguridad alimentaria y la sostenibilidad de los sistemas agropecuarios. Entre estos elementos, el Cd ocupa un lugar relevante por su elevada toxicidad, persistencia en el medio y capacidad para ser absorbido por las raíces, translocado a diferentes órganos vegetales y, finalmente, incorporado a la cadena alimentaria (Genchi et al., 2020). La acumulación de Cd en los productos agrícolas constituye un peligro potencial para la salud humana, particularmente cuando supera el umbral de tolerancia establecido por organismos internacionales. La UE establece límites obligatorios mediante el Reglamento (UE) 2023/915 (que sustituyó al 1881/2006).

En el caso del cacao, cultivo de notable importancia económica y sociocultural en América Latina, la problemática del Cd adquiere una relevancia especial. El Perú se ha consolidado como uno de los principales productores y exportadores de cacao orgánico en el ámbito mundial, en regiones amazónicas como Yurimaguas, existen iniciativas de fortalecimiento productivo y de calidad, aún no se reportan certificaciones internacionales consolidadas ni un sistema de producción intensiva en la zona, la información científica relacionada con la concentración y dinámica del Cd en suelos y tejidos foliares de cacao es

escasa, lo que limita la adopción de estrategias preventivas industriales y medidas correctivas para asegurar la calidad y seguridad del producto final (Evert et al., 2023).

Florida Rofner (2021) menciona que la presencia de Cd en las plantaciones de cacao puede tener un origen natural, derivado de la mineralogía y geología local, o bien ser resultado de acciones antropogénicas, como el uso de fertilizantes fosfatados contaminados o la proximidad a fuentes industriales (Khan et al., 2017). Su biodisponibilidad de este metal depende de características del suelo, como el pH, la textura, el contenido de MO y la calidad del agua de riego, los cuales determinan su movilidad y absorción por las plantas.

Por otra parte, la capacidad de acumulación de Cd puede variar significativamente entre genotipos de cacao, debido a diferencias en la morfología radicular, la fisiología foliar y otros atributos biométricos como el área foliar, la altura de planta y el peso de las semillas (Chancay Alcívar et al., 2022; Wade et al., 2022). Las hojas constituyen un bioindicador fundamental para evaluar la acumulación de Cd, dado que su contenido refleja la absorción y translocación del metal, además de permitir inferir posibles impactos sobre actividades vitales de la planta como la fotosíntesis y el crecimiento (Arévalo-Gardini et al., 2017).

En este contexto, la investigación se centra a determinar la concentración de Cd en suelo y hojas de tres genotipos de cacao cultivados en una plantación orgánica de Yurimaguas, así como a evaluar la asociación entre el contenido de Cd y los genotipos evaluados. Con el fin de generar información científica que sustente la sostenibilidad de la producción orgánica regional, contribuya al cumplimiento de las normativas internacionales y fortalezca la competitividad del cacao peruano en mercados de exportación.

1.2 Delimitación de la investigación

La presente investigación se centró a la evaluación de la presencia y acumulación de (Cd) en dos componentes fundamentales del sistema productivo del cacao: el suelo y el tejido foliar. El estudio se desarrolló en la región de Yurimaguas, considerando tres genotipos específicos: CCN 51, ICS 95 y un híbrido espontáneo.

El genotipo CCN 51 es ampliamente reconocido por su alta productividad y resistencia a plagas y enfermedades. No obstante, estudios previos han señalado que, bajo determinadas condiciones edáficas y prácticas de manejo, puede presentar niveles relevantes de acumulación de Cd (Lavado Sunilda, 2020). En cuanto al genotipo ICS 95, este es valorado por su calidad organoléptica y su estabilidad en la producción de cacao fino de aroma; sin embargo, su capacidad de acumulación de Cd puede variar según las características físico-químicas del suelo y el manejo agronómico aplicado. Por su parte, el híbrido espontáneo, resultado de polinizaciones naturales entre distintos materiales genéticos, constituye un material de interés debido a la posible variabilidad en su comportamiento fisiológico frente a la absorción y translocación de Cd, lo que permite establecer comparaciones entre respuestas genéticas diferenciadas (Santander Ruiz et al., 2021).

En el componente edáfico, se realizaron muestreos de suelo para determinar la concentración de Cd y su relación con posibles fuentes de contaminación y las propiedades físico-químicas del suelo en Yurimaguas. Asimismo, se evaluó el contenido

de Cd en hojas de los tres genotipos, con el fin de comparar su capacidad de absorción y acumulación del metal.

La delimitación geográfica (Yurimaguas), genética (CCN 51, ICS 95 e híbrido espontáneo) y analítica (determinación de Cd en suelo y hojas) permitió establecer un marco metodológico preciso para la interpretación de los resultados. De este modo, las conclusiones se vinculan directamente con las condiciones de producción de cacao orgánico en Yurimaguas, aportando evidencia técnica para la mejora de las prácticas agrícolas y la gestión de la inocuidad en la cadena productiva.

1.3 Formulación del problema

1.1.1. Problema general

¿Cuál es la concentración de (Cd) en el suelo y en las hojas de tres genotipos de cacao cultivados en una plantación orgánica de la localidad de Yurimaguas?

1.1.2. Problemas específicos

¿Cuál es la concentración de (Cd) presente en el suelo de una plantación orgánica con tres genotipos de cacao en Yurimaguas?

¿Cuál es la concentración de (Cd) presente en las hojas de tres genotipos de cacao cultivados en una plantación orgánica en Yurimaguas?

1.4 Formulación de objetivos

1.1.3. Objetivo general

Determinar la concentración de (Cd) en el suelo y en las hojas de tres genotipos de cacao cultivados en una plantación orgánica de Yurimaguas.

1.1.4. Objetivos específicos

- Determinar y contrastar la concentración de (Cd) en el suelo asociado a los genotipos CCN 51, ICS 95 y un híbrido espontáneo de cacao en una plantación orgánica en Yurimaguas.
- Determinar y comparar la concentración de (Cd) en hojas de los genotipos CCN 51, ICS 95 y un híbrido espontáneo de cacao cultivados en una plantación orgánica en Yurimaguas.

1.5 Justificación de la investigación

La investigación se justifica por la necesidad de garantizar la inocuidad del cacao orgánico producido en Yurimaguas y mantener su competitividad en mercados internacionales que establecen límites estrictos para el contenido de Cd. Conocer cómo interactúan las propiedades del suelo y las características genéticas de los genotipos CCN 51, ICS 95 y un híbrido espontáneo permitirá identificar materiales con menor capacidad de acumulación del metal y diseñar prácticas agrícolas que reduzcan su ingreso a la cadena alimentaria.

Los resultados de este estudio serán útiles para productores, entidades reguladoras y formuladores de políticas públicas, ya que aportarán evidencia científica para optimizar el manejo de suelos, seleccionar genotipos más seguros y desarrollar estrategias que

protejan la salud del consumidor y la sostenibilidad del cultivo. Adicionalmente, el hallazgo de materiales con baja absorción de Cd podría tener aplicaciones en programas de injertación y mejoramiento genético, contribuyendo al desarrollo de sistemas productivos más resilientes y sostenibles en la Amazonía peruana.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de estudio

Diversos estudios realizados en el Perú y otros países productores de cacao han evaluado la presencia y acumulación de (Cd) en suelos, hojas y granos, así como los factores que influyen en su absorción y translocación.

En la región San Martín, Mendoza et al. (2021) evaluaron plantaciones de cacao ubicadas entre 600 y 800 msnm. en la provincia de Lamas, recolectando muestras de granos, hojas y suelos. Los análisis revelaron que en determinados casos las concentraciones de Cd superaron los límites máximos permitidos por la Unión Europea. límites máximos permitidos, para cacao en polvo sin azúcar ($0,6 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) y con azúcar ($0,3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) De manera complementaria, Correa et al. (2021) en Tarapoto identificaron correlaciones significativas entre las características físico-químicas del suelo y el Cd disponible, destacando relaciones negativas con el potasio ($r^2 = -0,56$) y positivas con la densidad real ($r^2 = 0,42$). Además, se observó un impacto negativo en la biomasa cuando el Cd en el suelo superaba los $5 \mu\text{g g}^{-1}$ y se desarrolló un modelo de regresión lineal múltiple ($r^2 = 0,878$) para predecir el contenido de Cd en hojas.

En la región Ucayali, Florida Rofner et al. (2018) evaluaron la relación entre Cd en suelo, granos e indicadores edáficos en plantaciones de cacao CCN-51, encontrando concentraciones de $0,17$ a $0,23 \mu\text{g g}^{-1}$ en suelos y de $0,31$ a $0,43 \mu\text{g g}^{-1}$ en granos. Huauya-Rojas et al. (2012) analizaron suelos y hojas en 22 parcelas de cacao

orgánico en las regiones ribereñas de los ríos Huallaga y Tulumayo, encontrando concentraciones máximas de Cd en suelos de 1,82 y 1,63 $\mu\text{g g}^{-1}$ respectivamente, y en hojas de 0,21 $\mu\text{g g}^{-1}$, con niveles más altos en hojas maduras.

En la región Huánuco, Florida Rofner, Claudio Melchor et al. (2018) evaluaron 20 fincas asociadas a la Cooperativa Cacao Alto Huallaga, determinando en plantaciones de cacao CCN-51 concentraciones promedio de 0,32 $\mu\text{g g}^{-1}$ en suelo y 0,98 $\mu\text{g g}^{-1}$ en granos. Huamaní-Yupanqui et al. (2012) reportaron en parcelas orgánicas de Huánuco y Ucayali concentraciones promedio de 0,21 mg kg^{-1} de Cd y 0,58 mg kg^{-1} de plomo en granos.

En otras regiones del Perú, Rosales Huamani et al. (2021) en Satipo (Junín) evaluaron suelos con cacao forastero y determinaron que las concentraciones de Cd y Pb estaban por debajo de los límites establecidos por el Ministerio del Ambiente (MINAM).

En el ámbito internacional, Gutiérrez, E., Chávez, E., Gamage, K. H. H., Argüello, D., Galkaduwa, M. B., & Hettiarachchi, G. M. (2022) en el sur de Ecuador reportaron que la concentración de Cd en granos de cacao superó el nivel crítico (0,6 mg kg^{-1}), observando un patrón decreciente: granos > cáscaras > hojas. Barrezueta-Unda et al. (2021) en el sur de Ecuador determinaron concentraciones de Cd de 0,36 a 2,59 $\mu\text{g g}^{-1}$ en hojas, 1,15 a 2,36 $\mu\text{g g}^{-1}$ en testa y 1,15 a 1,93 $\mu\text{g g}^{-1}$ en almendras, asociando los niveles más altos con pH ácido y aplicación de fertilizantes fosfatados.

A nivel regional sudamericano, Florida Rofner et al. (2018) recopilieron información sobre los niveles de Cd en suelos agrícolas y su acumulación en granos de cacao, evaluando su posible impacto en las exportaciones de cacao nativo. Asimismo, Chancay Alcívar et al. (2022) destacaron que el Cd puede permanecer en

el ambiente entre 10 y 30 años, con una excreción lenta, y que su consumo crónico está asociado a daños en hígado, pulmones, riñones, testículos, sistema óseo y al desarrollo de carcinomas. Finalmente, Arévalo-Gardini et al. (2016) reportaron que, en el norte, centro y sur de Tumbes y Piura, los suelos de Tumbes presentaron las concentraciones más altas de Cd en comparación con Piura.

2.2. Bases teóricas científicas

2.2.1. El cacao (*T. cacao* L.)

El cacao, es un árbol tropical de porte medio, nativo de la región de la cuenca amazónica. Actualmente, este cultivo se realiza en zonas tropicales húmedas, como cultivo principal o integrado con otras especies dentro de sistemas agroforestales (Maximova et al., 2008), aunque aún persiste una disputa acerca del origen del cacao (Motamayor et al., 2002).

2.2.2. Aspectos botánicos del cacao

- De acuerdo a de Souza et al., (2018) los aspectos más relevantes son:

Taxonomía. El cacao pertenece al género *Theobroma*, especie cacao.

Morfología:

Hojas. Simples, coriáceas, enteras o ligeramente sinuadas, lanceoladas a obovado-elípticas, ligeramente asimétricas.

Flores. Pequeñas, rosadas, caulinares (desarrollándose en el tronco y ramas).

Fruto. Mazorca, una baya grande con numerosas semillas (habas).

Distribución. Nativo de las regiones tropicales de América, se cultiva en áreas entre 20°N y 20°S.

Hábitat. Crece en el sotobosque de bosques lluviosos tropicales.

Suelo. Prefiere suelos con buen drenaje, con pH entre 5,0 y 7,5 (óptimo 6,5-

7,5).

Polinización. Depende de insectos, principalmente dípteros como *Forcipomyia*.

Enfermedades. Sufre de enfermedades como la moniliasis (causada por *Moniliophthora*), que puede reducir significativamente la producción.

Variedades. Existen diferentes variedades de cacao, como Criollo, Nacional, Amelonado, Contamana, Curaray, Guiana, Iquitos, Marañón, Nanay, Purús

2.2.3. Tipos de cacao

Forastero. Oriundo de la región de la cuenca del Amazonas, el cacao se cultiva y comercializa en cuatro continentes productores: América, Asia, África y Oceanía. Representa el genotipo que es más cultivada a nivel global, con una participación del 80%. Se le denomina "Amazonas" debido a su amplia distribución en la cuenca amazónica y sus afluentes. Este tipo de cacao es utilizado para elaborar chocolate con un sabor característico y esencial a cacao (Mora Ibarra, 2019).

Trinitario. Los frutos tienen una forma oblonga y presentan un color verde. Se considera que esta variedad se originó a partir de un cruzamiento natural de una variedad criolla y un clon brasileño con forma de melón. Por esta razón, se reconoce a Trinidad y Tobago como su lugar de origen (Rodríguez-Velázquez et al., 2022).

Híbridos o cacao dulce. Actualmente, estas variedades están sustituyendo a las plantaciones añejas de 'Forasteros' por su notable capacidad para adaptarse a diversas cualidades ambientales y a la elevada capacidad de sus frutos. Se distinguen por tener frutos de cáscara lisa y semillas redondeadas, que

varían en color desde blanco hasta violáceo, además de ofrecer un sabor agradable. La superficie del fruto presenta 10 surcos longitudinales bien definidos, de los cuales 5 son más profundos que los otros que se alternan con ellos. Las protuberancias, conocidas como espinas, son notorias, con una textura verrugosa y una forma irregular (MINAGRI, 2003).

Los avances en análisis genómicos han permitido refinar la estructura poblacional del cacao, pasando de la tradicional división en tres tipos (Criollo, Forastero y Trinitario) a una clasificación más precisa en diez grupos genéticos como son: Marañón, Curaray, Criollo, Iquitos, Nanay, Contamana, Amelonado, Purús, Nacional y Guayana (Motamayor et al., 2008)

En el estudio de Arévalo-Gardini et al. (2019), se analiza la variedad tradicional *Piura Porcelana*, un cacao fino cultivado en el norte de Perú. Se evidenció que, aunque comparte gran parte de su estructura genética con el cacao Nacional de Ecuador, presenta diferencias genéticas significativas que lo distinguen como un linaje único. Además, los datos apuntan a que sus ancestros provienen de poblaciones silvestres de los valles de los ríos Santiago y Morona, lo que sugiere una posible domesticación independiente en esa región del Perú.

En investigaciones recientes, se ha analizado el comportamiento diferencial de genotipos de cacao frente a la acidez del suelo. Por ejemplo, Arévalo-Hernández et al. (2022) evaluaron 60 genotipos (30 silvestres y 30 domesticados) en condiciones de suelo ácido con y sin encalado, encontrando variaciones significativas en crecimiento y nutrición.

2.2.4. Características de los genotipos de cacao en estudio

Cacao CCN 51. De acuerdo con Panduro Soto (2018), es casi un genotipo que se cultiva en Ecuador. Hoy por hoy está integrado en el sistema y reemplaza las viejas plantaciones de 'Forasteros' porque se adapta a las condiciones ambientales. Esta planta da frutos de buena calidad, además de ser lisos, semillas redondas, un color que varía del morado y de sabor agradable.

El clon de cacao ICS 95 destaca por su alto rendimiento y vigor en Trinidad, mostrando un buen desempeño casi en todos los tipos de suelo. En América Latina, es reconocido por su resistencia a la moniliasis. Este clon ha sido registrado como uno de los mejores de la serie ICS debido a su elevada productividad y confiable con mucha resistencia a enfermedades. Además, el ICS 95 forma parte del reducido grupo de clones ICS que han sido introducidos en diversos países para ser utilizados como base en programas de mejoramiento genético (Venturo Minauro, 2017).

Híbrido espontáneo. Es una planta de cacao que no se conoce sus parentales, es un híbrido que ha sido sembrado sin ningún criterio técnico (Aguirre-Forero et al., 2020).

2.2.5. descripción de la planta de cacao.

De Souza et al. (2018), la característica de una planta de cacao:

Altura. Las plantas de cacao pueden proyectarse una altura de entre 5 y 8 metros, con una copa que varía en diámetro entre 4 y 6 metros. Sin embargo, su altura puede variar según las condiciones del entorno; por ejemplo, en los bosques, pueden crecer hasta 20 metros debido a la competencia por la luz.

Sistema radicular. Debido a que la raíz del cacao es rotatoria, su desarrollo en profundidad y forma se determinarán por la estructura, textura y consistencia del suelo. Por lo general, la mayoría (70 a 90 %) de las raíces secundarias absorben los nutrientes en los primeros 30 cm del suelo

Tallo. Es de crecimiento vertical y al inicialmente es liso, pero con el transcurso del tiempo, este evoluciona hacia un tallo más áspero y rugoso. Alrededor del segundo año, las orquetas se forman para formar la copa, compuesta por ramas laterales y secundarias.

Hojas. Las hojas son de forma oblonga, acuminadas y glabras con una notable nervadura central. Las hojas recién nacidas tienen un tono verde, algunas más o menos rosadas, y algunas suelen tener un tono violeta, dependiendo del cultivo.

Flores. Las flores del cacao emergen desde las puntas de las axilas de hojas maduras, formando cojines florales que se ubican en el tronco o en ramas fuertes. Son flores hermafroditas y presentan por cinco pétalos, cinco sépalos, cinco estambres, cinco estaminodios y un pistilo que contiene cinco óvulos. La fecundación depende de los insectos, principalmente las especies del género *Forcipomya*, pertenecientes a la familia *Ceratopogonidae*.

Fruto. El cacao está formado por una cubierta que tiene tres partes. La capa externa es gruesa y carnosa; la parte del medio es más firme; y la capa interna también es carnosa, pero más delgada. Cuando el fruto todavía no está maduro, normalmente es de color verde, y a medida que madura cambia a amarillo. En algunas variedades que son de color púrpura, el fruto se vuelve

anaranjado al madurar. Desde que ocurre la polinización hasta que el fruto alcanza su madurez pasan, en promedio, unos 167 días.

2.2.6. Metales pesados

El Cd es reconocido un metal pesado que tiene una alta toxicidad y con gran capacidad de bioacumulación en las plantas, produciendo perturbaciones significativas en el movimiento o translocación de nutrientes y agua dentro de la planta (Reyes et al., 2016).

Según, Chancay-Alcívar et al. (2022), el Cd es un metal pesado que no contiene ningún uso biológico y su presencia en la corteza terrestre es limitada. No obstante, su acumulación ha incrementado de forma significativa en las recientes décadas, principalmente debido a las actividades industriales.

Los metales pesados en el suelo han llamado mucho la atención debido a su impacto directo en la degradación del suelo, su toxicidad para las plantas y su efecto negativo en la calidad ambiental. Además, se caracterizan por su capacidad para bioacumularse, persistir en el medio ambiente y ser no biodegradables (Torres-Gonzales et al., 2021).

La aplicación de abonos fosfatados representa la primera causa de acumulación en los suelos agrícolas. Además, otras fuentes incluyen los lodos provenientes de depuradoras y el agua utilizada para riego (Lasluiza Quishpe, 2022).

2.2.7. Contenido de Cd en el cacao

Chupillón Cubas (2017), estudio realizado en Tarapoto, observó el contenido promedio de Cd ($8,2 \mu\text{g planta}^{-1}$) y plomo ($33,7 \mu\text{g planta}^{-1}$) de las hojas de 6 variedades de cacao fue superior a la registrada en las raíces, donde se detectaron $2,9 \mu\text{g planta}^{-1}$ de Cd y $16,7 \mu\text{g planta}^{-1}$ de plomo. Además, los clones con menor volumen para absorber estos metales pesados fueron POUND-12 y IMC-67, ambos de $8 \mu\text{g planta}^{-1}$, y el cacao criollo con $5,4 \mu\text{g planta}^{-1}$, cuando se expusieron a una concentración de 25 mg L^{-1} de Cd por planta.

Miranda et al. (2008), argumentan la cantidad total de Cd en las hojas podría variar según su edad, ya que las hojas más antiguas tienden a acumular una mayor acumulación de Cd en comparación con las hojas jóvenes, lo cual se atribuye a la existencia de péptidos

Herrera Marcano (2020), señala que la distribución de la concentración de Cd en el cultivo de cacao sigue una matriz decreciente en sus diferentes estructuras, comenzando por la raíz, seguida del tallo, las hojas y, finalmente, el fruto.

Álvarez Morales et al. (2021), en las investigaciones ejecutadas en la selva, mostraron que la absorción de Cd en plantaciones de cacao difiere y varía en base a su edad. Según análisis foliares, el cultivo de cacao decrece en un año presentando una concentración de $2,78 \mu\text{g g}^{-1}$ de Cd, mientras que en plantas mayores de un año fue de $0,97 \mu\text{g g}^{-1}$. Esto sugiere que, en relación al incremento de la edad, se desarrolla un sistema radicular más extenso; la asimilación de Cd disminuye.

Llatance et al. (2018), en estudios realizados en la Comunidad Nativa de Pakun, ubicada en el Anexo de Chiriaco, Distrito de Imaza, Provincia de Bagua, región Amazonas, a 297 msnm., analizaron la concentración de Cd en las plantaciones de cacao. Los resultados mostraron que el contenido de Cd fue de $1,68 \mu\text{g g}^{-1}$ en las raíces, $0,75 \mu\text{g g}^{-1}$ en los tallos, $0,51 \mu\text{g g}^{-1}$ en las hojas y $0,411 \mu\text{g g}^{-1}$ en los frutos. Además, se identificaron 7 especies vegetales con aforo para bioacumular Cd, entre ellas: *Pouteria caimito*, *Matisia cordata*, *Attalea* sp., *Malvaviscus* sp., *Vochysia* sp., *Carludovica palmata* y *Theobroma cacao*.

2.2.8. Límites máximos del Cd

La UE fijó umbrales de concentraciones máximas toleradas de Cd para el cacao, estableciendo un valor que oscila entre $0,6$ y $0,8 \mu\text{g g}^{-1}$. No obstante, se estableció este valor para los productos procesados de cacao. Dado que no existe un valor para los productos de cacao sin procesar, varios autores han empleado esta categoría para sus comparativas (Rofner, 2021). Dado que la UE impuso límites para la concentración de Cd en derivados de cacao procesado, Meter et al. (2019), propusieron una proporción aceptable de Cd en cacao sin tratar, fijándolo en $1,14 \mu\text{g g}^{-1}$. Por otro lado, Rofner, (2021) recomendó un valor ligeramente superior, de $1,22 \mu\text{g g}^{-1}$.

los mercados de exportación, especialmente la UE, exigen límites máximos de cadmio en productos derivados del cacao que se comercializan en su territorio. Según el Reglamento (UE) No. 488/2014, se establecen niveles máximos de cadmio de $0,10 \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ para chocolates con menos del 30 % de sólidos secos de cacao, $0,30 \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ para chocolates con 30 %–50 % de cacao, $0,80 \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ para

chocolates con 50 % o más de cacao y $0,60 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ para cacao en polvo vendido al consumidor final (Reglamento UE 488/2014). A nivel internacional, la Codex Alimentarius Commission ha considerado límites similares, con niveles máximos de hasta $0,8\text{--}0,9 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ para productos de chocolate con mayor proporción de sólidos de cacao, con el objetivo de proteger la salud del consumidor en los productos alimenticios

2.2.9. Impacto del Cd en el cacao

Los altos niveles de (Cd) presentes en el cacao y en productos derivados, como el chocolate, constituyen una preocupación creciente para la salud pública. Aunque la normativa internacional establece un límite máximo de $0,8 \mu\text{g g}^{-1}$ en productos procesados, los mecanismos que regulan la absorción de Cd desde el suelo hasta el grano aún no han sido completamente esclarecidos. Con el fin de comprender mejor esta dinámica, Wade et al. (2022) recopilaron datos climáticos, edáficos y vegetales en la región conocida como el “Cinturón del Cacao”, ubicada en zonas ecuatoriales. Mediante algoritmos de árboles de regresión, identificaron que los factores más determinantes en la acumulación de Cd en granos son el contenido total de Cd en el suelo, el pH del mismo y los niveles de Cd en hojas, mientras que el carbono orgánico del suelo (SOC) y el Cd disponible mostraron una influencia mínima. De manera interesante, tanto el pH como el SOC actuaron como factores atenuantes, reduciendo la transferencia del metal desde el suelo hacia los granos.

Dado que la remediación de suelos contaminados por Cd implica elevados costos técnicos y económicos, los autores sugieren priorizar estrategias basadas

en la fisiología vegetal, tales como el desarrollo de variedades con baja capacidad de absorción de metales o la utilización de portainjertos resistentes, en lugar de centrarse exclusivamente en el manejo del suelo.

En Sudamérica, la presencia de Cd en plantaciones de cacao ha generado restricciones en las exportaciones, especialmente hacia los mercados europeos. En el contexto amazónico peruano, áreas como el corredor Campo Verde Honoría Tournavista se ven afectadas adicionalmente por procesos de deforestación y uso no sostenible del suelo. El Cd, además de su efecto tóxico, interfiere en la absorción de nutrientes y agua, provoca estrés oxidativo y altera procesos fisiológicos clave en las plantas.

Frente a ello, Haider et al. (2021) analizan diversas estrategias de mitigación que incluyen el uso de biocarbón, compost, reguladores de crecimiento y técnicas de fitorremediación, las cuales han mostrado potencial para reducir las concentraciones de Cd en suelos agrícolas y, en consecuencia, en la cadena productiva del cacao.

2.2.9.1. Técnicas de muestreo para determinar el contenido de Cd en el suelo y hojas de plantación de cacao.

2.2.9.2. Lineamientos para muestreo de suelos

El Cd que se encuentra en el suelo podría tener dos orígenes principales: natural (geoquímico), derivado de los procesos de evolución del suelo y la estructura de la roca madre, y antrópico, producto de actividades humanas que incorporan este metal al suelo, ya sea de forma intencional o accidental. En el ámbito regulatorio peruano, el Decreto Supremo N.º 012-2017-MINAM

establece los criterios para definir un suelo como contaminado, específicamente cuando contiene sustancias provenientes de actividades antrópicas que superan los límites permisibles. Además, esta normativa amplía su alcance a otros componentes ecológicos, así como las aguas subterráneas profundas y los sedimentos (MINAM, 2017).

Para analizar los niveles de Cd en el suelo, es necesario realizar un muestreo basado en protocolos específicos para evaluar la contaminación por metales pesados (excluyendo métodos de muestreo con enfoque agronómico). Este enfoque permite analizar la posible translocación del Cd hacia los granos del cacao y las hojas, así como comprender los mecanismos de transferencia de este metal y la bioacumulación en el proceso suelo-planta (MINAGRI, 2018).

2.2.9.3 Lineamientos para muestreo de hojas en cultivo de cacao

Bonomelli et al. (2003) refieren que el análisis de hojas es un instrumento ampliamente usado para determinar la condición nutricional de las plantas, ya sea identificando deficiencias o toxicidades. Por ello, se plantea emplearlo para determinar la acumulación total de Cd en hojas, basándose en pericias desarrolladas en Colombia, Ecuador y Perú. Para este propósito, se establecen los lineamientos siguientes:

- **Selección de plantas.** Los muestreos deben provenir de plantaciones de igual genotipo, con edades que fluctúan de 5 y 10 años, preferiblemente durante la etapa de floración.
- **Condición de las hojas.** Las hojas seleccionadas no deben presentar daños causados por enfermedades o plagas ni contener rezagos de plaguicidas o

fungicidas que incluyan componentes metálicos en su composición.

- **Muestreo.** De la misma variedad, se muestrearán al azar 10 árboles. De cada árbol, se recopilarán 4 hojas de las direcciones cardinales, seleccionando hojas del centro del árbol.
- **Ubicación de la hoja.** Cortando desde la base e incluyendo el pecíolo, el folio que se va a cosechar debe ser el cuarto desde la posición apical de la rama.
- **Preparación.** Las 40 hojas recolectadas (4 de cada árbol) deben colocarse en una bolsa de papel y enviarse al laboratorio. Allí, se secarán en un horno ventilado a 60°C durante un mínimo de 24 horas y luego se triturarán.
- **Análisis.** Se separará un gramo de la muestra molida, que será incinerado en una mufla calibrada a 400°C durante 24 horas hasta obtener cenizas. Estas serán procesadas mediante métodos analíticos acreditados para la cuantificación de metales, como absorción atómica o ICP-MS.
- **Precauciones.** Para asegurar resultados confiables, es crítico eliminar cualquier forma de contaminación durante la recolección y guardado de las muestras para garantizar resultados precisos.

2.3. Definición de términos básicos

- **Cd.** Es un metal presente en los suelos, originado por procedimientos naturales, así como por las erupciones volcánicas, la erosión de rocas y los fosfatos marinos, así como por actividades humanas (Chancay Alcívar et al., 2022).
- **Toxicidad.** Se refiere al nivel en que una sustancia puede ser dañina o provocar lesiones (Del Olmo Rodrigo, 2017)
- **Metales pesados.** En la agricultura, son aquellas sustancias químicas con alta densidad (generalmente mayor a 5 g cm⁻³), como el (Cd), plomo (Pb),

mercurio (Hg) y arsénico (As), que pueden encontrarse en suelos agrícolas debido a actividades antropogénicas como el uso de fertilizantes fosfatados, pesticidas, aguas residuales y emisiones industriales (Alloway, 2013).

- **Suelo con Cd.** La movilidad del Cd y sus compuestos en el suelo está sujeta a diversos aspectos, como el contenido de coloides y el pH, los cuales difieren en base a las condiciones locales. Este metal suele estar estrechamente asociado a la materia orgánica, donde mantiene inmóvil, es asimilado por las plantas y eventualmente ingresa al consumo alimentario (Del Olmo Rodrigo, 2017).
- **Cacao orgánico.** Es aquel producido a partir de granos de cacao cultivados sin el uso de fertilizantes sintéticos, herbicidas ni pesticidas químicos (Huamaní- Yupanqui et al., 2012).
- **Genotipo.** En cacao (*Theobroma cacao* L.), el genotipo se refiere a la constitución genética específica de una planta o variedad, la cual determina sus características heredables, como el rendimiento, la resistencia a enfermedades, la adaptación ambiental y atributos de calidad del grano, tales como sabor, color, palatabilidad y valor nutricional (Arrazate et al., 2021).

2.4. Formulación de hipótesis

2.4.1. Hipótesis nula

Ho: Las concentraciones de (Cd) en el suelo y en las hojas de tres genotipos de cacao orgánico no difieren entre sí.

Hipótesis alternativa

Ha: Las concentraciones de (Cd) en el suelo y en las hojas de tres genotipos de cacao orgánico difieren entre sí.

2.5. Identificación de variables

2.5.1. Variable independiente

X. Genotipo de cacao en plantación orgánica.

- Dimensión. Material genético de cacao.

- **Indicadores:**

- CCN 51.

- ICS 95.

- Híbrido espontáneo.

Variables dependientes

Y1. Contenido de Cd en suelo y hojas de los genotipos de cacao

Dimensión: Contenido de Cd en suelo y hojas de los genotipos de cacao

Indicadores:

- Concentración de Cd en el suelo ($\mu\text{g g}^{-1}$).

- Concentración de Cd en hojas de cacao ($\mu\text{g g}^{-1}$).

2.6 Operacionalización de variables

Tabla 1.

Hipótesis	Variable	Definición Conceptual	Definición Operacional	Dimensiones	Indicadores	Unidad de medición	Técnica
V. Independiente							
H0: Las concentraciones de (Cd) en el suelo y en las hojas de tres genotipos de cacao orgánico no difieren entre sí.	Genotipo de Cacao en plantación orgánica.	Es un injerto de un híbrido espontáneo con un clon mejorado (Lohse Duarte, 2018)	Identificación de variedad de cacao en una plantación orgánica	Genotipos de cacao	- Variedad de cacao: CCN 51, ICS 95 e Híbrido - 9 plantas por variedad con tres repeticiones para un total de 27 plantas.	27 plantas 27 plantas (g plantas) 27 plantas (g plantas)	Observación
V. Dependiente							
Ha. Las concentraciones de (Cd) en el suelo y en las hojas de tres genotipos de cacao orgánico difieren entre sí.	Contenido de Cd en suelo y hojas de cacao.	La acumulación de Cd en suelo y hojas máximo es de $0,8 \mu\text{g g}^{-1}$ (A. Meter, 2019)	Recolección de suelo y hojas de cacao.	Contenido de Cd en suelo y hojas de 03 genotipos de cacao.	Muestras de suelo: 27 plantas 45 hojas por variedad de cacao	Suelo hojas	Observación

Fuente. Elaboración propia

CAPÍTULO III. METODOLOGÍA Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN

3.1. Tipo de investigación

La investigación fue observacional, no experimental y de corte transversal, orientada a estimar y comparar la concentración de (Cd) en suelo y hojas de los tres genotipos (CCN 51, ICS 95 e híbrido) de cacao en el distrito de Yurimaguas.

3.2. Nivel de investigación

El nivel fue descriptivo-comparativo y correlacional, dado que se describieron niveles de Cd por genotipo, se compararon entre genotipos y se evaluaron asociaciones entre Cd en suelo, Cd foliar y biometría de plantas.

3.3. Métodos de investigación

3.3.1. Muestreo de suelo

El muestreo de suelo se efectuó siguiendo las directrices del Ministerio de Agricultura y Riego (MINAGRI, 2018) para la determinación de cadmio en sistemas de producción de cacao. Para ello, se seleccionaron 27 plantas representativas de la parcela, correspondientes a los genotipos CCN 51, ICS 95 y un Híbrido, asignándose nueve plantas a cada grupo.

De acuerdo con el protocolo, en cada planta se recolectaron cuatro submuestras de suelo entre 0 y 20 cm de profundidad, ubicadas dentro de un radio aproximado de 1 m de la proyección de la copa. La distribución de las submuestras siguió un patrón espacial orientado a captar la variabilidad del suelo en la zona activa de absorción radicular. La extracción se realizó con un barreno tipo holandés y herramientas previamente desinfectadas para evitar la contaminación cruzada. En total se obtuvieron 108 submuestras, las cuales fueron integradas por genotipo en recipientes limpios y homogenizadas según las recomendaciones del MINAGRI.

A continuación, mediante el método de cuarteo, se prepararon tres muestras compuestas por genotipo, cada una conformada por 36 submuestras y con un peso aproximado de 1 kg, cumpliendo con la cantidad mínima necesaria para el análisis de cadmio. Finalmente, las nueve muestras compuestas fueron etiquetadas y enviadas a un laboratorio acreditado, siguiendo un procedimiento de cadena de custodia conforme a lo establecido en los lineamientos técnicos del MINAGRI (2018).

Las muestras se procesaron en el laboratorio acreditado del Instituto de Cultivos Tropicales (ICT). Se procesaron a temperatura ambiente, molidas y tamizadas con un diámetro granulométrico de 2 mm. La concentración de Cd fue determinada mediante espectrofotómetro de Absorción atómica (AAS) digeridas con ácido fluorhídrico y ácido nítrico.

3.3.2. Muestreo foliar

Por plantas se colectaron 5 hojas fisiológicamente sanas (considerando estratos alto, medio y bajo; exposición hojas (9 plantas x 5 hojas), sol/sombra). Por genotipo, esto resulto

en 45. A partir de esas 45 hojas /genotipos se conformaron 3 muestras compuestas por genotipos, cada una con 15 hojas (200 g fresco), para un total de 9 muestras compuestas en los tres genotipos (135 hojas en total).

Las hojas fueron transportadas en sobres manila bajo las mismas condiciones que las muestras de suelo. En el laboratorio del ICT, las hojas fueron procesadas, identificadas, marcadas y etiquetadas para su análisis químico completo. La determinación del Cd se realizó mediante espectrofotómetro de (AAS), tras una digestión previa de las muestras con ácido nítrico y ácido fluorhídrico. En total, se analizaron 27 plantas con un total de 45 hojas por variedad de cacao.

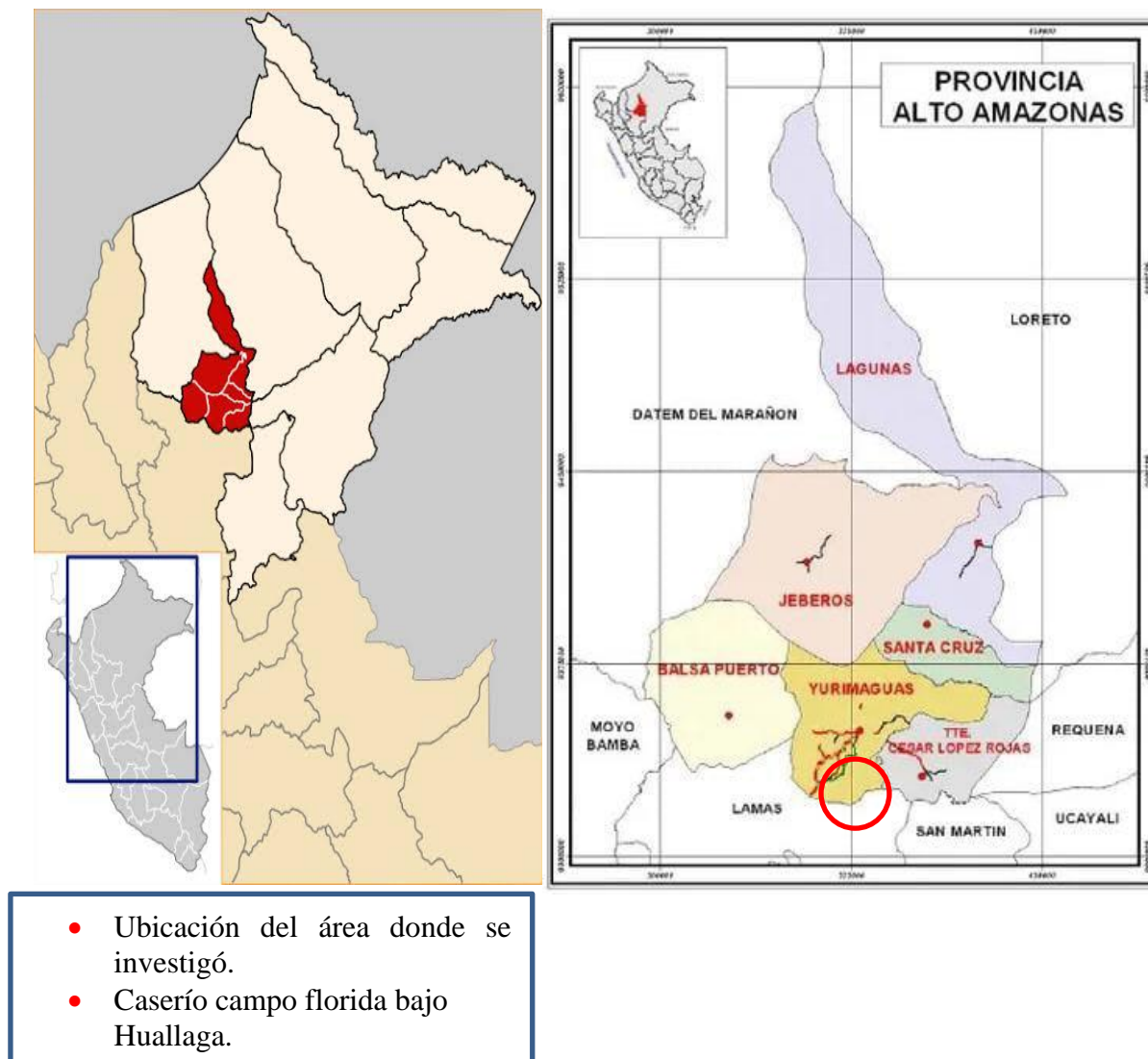
3.3.1. Ubicación de la investigación

El presente estudio se realizó en el fundo Sagrado Corazón, en un área de 6 ha de plantas de cacao orgánico genotipos CCN 51, ICS 95 y un híbrido, localizado geográficamente en el ámbito del distrito de Yurimaguas en las coordenadas de referencia: 5°49'30.8" latitud sur; 76° 03'43.5" Longitud oeste y altitud de 182 msnm.

El clima de la región Loreto, de acuerdo con la clasificación de SENAMHI (2022), presenta temperaturas medias máximas de 36 °C y promedio mínima de 19,6 °C, con precipitaciones medias mensuales de 65 mm.

Figura 1.

Ubicación geopolítica del distrito de Yurimaguas/provincia de Alto Amazonas/Loreto

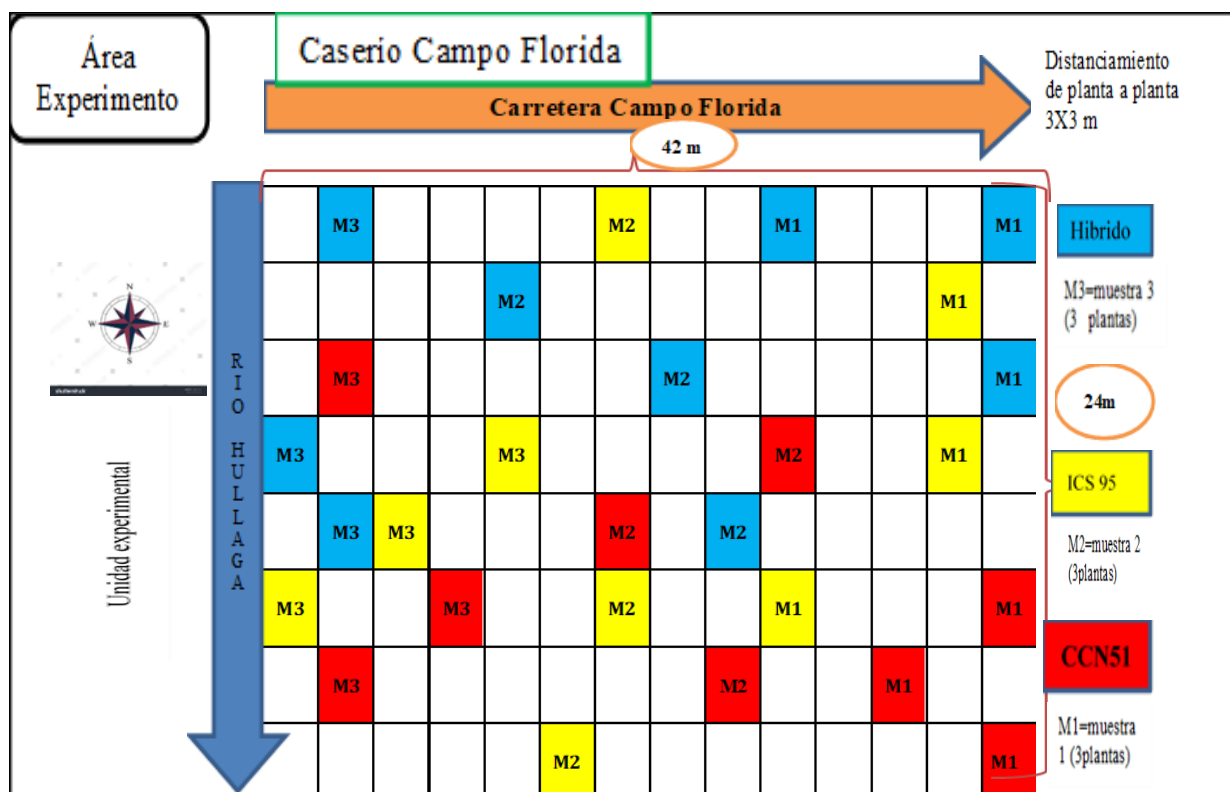


3.4. Diseño de investigación

El diseño del estudio fue No experimental, transeccional. Se evaluó una única evaluación en un sistema productivo de cacao orgánico certificado en etapa de producción. El factor de estudio fue el genotipo con tres niveles: CCN 51, ICS 95 y híbrido. La unidad experimental fue la muestra compuesta de suelo u hoja, con tres réplicas por genotipo, obteniéndose un total de nueve muestras por matriz.

Figura 2.

Diseño de la instalación del trabajo de investigación en campo. Población y muestra



3.5. Población y muestra

- **Población.** Los pobladores de cacao orgánico en Yurimaguas.
- **Muestra.** 27 plantas (9 por genotipo) para definir compuestas de suelo y hoja (3 compuestas por genotipo y matriz)

3.6. Técnicas e instrumento de recolección de datos

3.6.1. Técnicas

Para la elaboración de la investigación se empleó la siguiente técnica:

Observación directa: Se aplicó un registro de observación para determinar los puntos de muestreo y registrar las características específicas de cada uno de ellos.

3.6.2. Instrumentos

Para la elaboración de la investigación se aplicó el siguiente instrumento:

- **Campo.** Barreno holandés, machete, bolsas/sacos grado analítico, sobres manila, balanza, GPS.
- **Laboratorio.** AAS (p. ej., Varian SpectrAA 55B o equivalente, lámpara de Cd), estufa, molino, tamices 2 mm, material de vidrio grado analítico.
- **Reactivos.** HNO₃ (traza) y H₂O₂ (traza) para digestión.
- **Software.** R para análisis y gestión de datos.

3.6.3. Recolección de datos

La investigación se desarrolló en el fundo “Sagrado Corazón”, con una superficie de 6 ha de cacao orgánico en etapa productiva. Se evaluaron 27 plantas, seleccionadas mediante muestreo dirigido, distribuidas equitativamente en tres genotipos: 9 plantas de CCN 51, 9 de ICS 95 y 9 de un híbrido.

La recolección de muestras de suelo y hojas se realizó en una única ocasión. Esta consistió en la extracción de muestras de suelo y de hojas con el propósito de evaluar los niveles de acumulación de Cd en el suelo, en las hojas y en la biometría de plantas de cacao pertenecientes a tres genotipos, cada uno con tres repeticiones.

Se recolectaron las muestras de suelo siguiendo el procedimiento establecido por Chávez et al. (2015) y las recomendaciones del MINAM (2013).

3.7. Selección, validación de los instrumentos de investigación

3.7.1. Selección de los Instrumentos de Investigación

Para identificar la concentración de Cd en las hojas y suelo de los genotipos de cacao orgánico, se eligieron los siguientes instrumentos:

a. Muestreo de suelo y hojas. Para el acopio de muestras de suelo, se utilizó un barreno tipo holandés, extrayendo material a una profundidad de 20 cm. En el caso de las hojas, se seleccionaron hojas maduras provenientes de las zonas alta, media y baja del dosel de los árboles de cacao.

b. Equipo de laboratorio. La medición del Cd se desarrolló utilizando Espectrometría de (EAA) con horno de grafito, lo que permitió una detección precisa de sus concentraciones expresadas en (ppm; $\mu\text{g g}^{-1}$).

c. Reactivos químicos. Para la digestión ácida de las muestras, se utilizaron reactivos de alta pureza, entre ellos ácido nítrico (HNO_3) y peróxido de hidrógeno (H_2O_2).

d. Software de análisis estadístico. Los datos fueron organizados y analizados utilizando los programas estadísticos R.

3.7.2. Validación de los Instrumentos de Investigación

La validación de los instrumentos se llevó a cabo mediante los siguientes procedimientos:

• **Calibración del equipo de laboratorio.** Se realizaron calibraciones periódicas del espectrofotómetro de absorción atómica utilizando estándares certificados de Cd.

- **Pruebas piloto.** Se realizaron análisis previos con un conjunto reducido de muestras para verificar la eficiencia del proceso de digestión y detección del Cd.
- **Control de calidad.** Se incluyeron muestras de referencia certificadas y se aplicó el método de recuperación para garantizar la exactitud de las mediciones.
- **Reproducibilidad.** Se efectuaron mediciones triplicadas en cada muestra para evaluar la consistencia de los resultados.

3.7.3. Validación de los Instrumentos de Investigación

Con el objetivo de garantizar la trazabilidad y el control de los instrumentos utilizados, se adoptaron las siguientes estrategias:

- **Registro de muestras.** Todas las muestras de suelo y hojas fueron marcadas con un código único y apuntadas en una base de datos para su seguimiento.
- **Mantenimiento del equipo.** Se inició un programa de mantenimiento preventivo para los instrumentos del laboratorio.
- **Documentación del procedimiento.** Se mantuvieron registros detallados de cada fase del análisis, desde la recolección de muestras hasta la obtención de resultados.
- **Supervision y auditoria.** El equipo de investigación realizó verificaciones periódicas para asegurar el cumplimiento de los protocolos establecidos para el muestreo y el análisis.

3.8. Técnicas de procesamiento y análisis de datos.

Los resultados se analizaron debidamente analizados y se comprobó con las pruebas de Shapiro-Wilks Dado que los datos no cumplieron con la normalidad, se

realizó la prueba para datos no paramétricos de Kruskal Wallis. Para las variables significativas se realizó intervalo de confianza al 95%.

A fin de realizar la relación entre variedades con el contenido de Cd en suelo y hojas se realizó el análisis de correlación Spearman.

3.9. Orientación ética, epistemológica y filosófica

La investigación se fundamentó en el empirismo y el positivismo, ya que su objetivo fue generar conocimiento verificable y cuantificable sobre la acumulación de Cd en hojas y suelo de cacao. Para lograrlo, se aplica métodos científicos rigurosos y técnicas de análisis químico estandarizadas, asegurando la objetividad de los resultados y minimizando cualquier posible sesgo subjetivo en la interpretación de los datos.

Orientación filosófica

El estudio se fundamentó en el pragmatismo, en la medida en que su propósito fue generar conocimiento aplicable a la producción sostenible del cacao orgánico en Yurimaguas. Además, adoptó una perspectiva ecológica y holística, considerando las interacciones entre los suelos, las plantas y el entorno agrícola en el contexto del impacto del Cd en los cultivos de cacao. Esta visión integral permitió aportar soluciones viables y sustentables a los desafíos ambientales y productivos del sector cacaotero.

CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1 Presentación, análisis e interpretación de resultados

4.1.1. De las características físico-químicas del suelo

En la Tabla 2. Se presentan los resultados del análisis fisicoquímico del suelo de los tres genotipos en estudio. El suelo mostró: el pH ligeramente ácido entre (5,9 y 6,19); CE baja (0,02–0,03 dS/m) y contenidos de CaCO₃ prácticamente ausente (< 0,5 %). La materia orgánica fue media (2,10–2,35 %), con CIC entre medio y alto (16,94 y 23,11 cmolc/kg) y saturación de bases moderada – alta (61–78 %). Las bases intercambiables estuvieron dominadas en todos los genotipos, donde el Ca (9,43–16,11 cmolc/kg) fue seguido de Mg (0,73–1,65 cmolc/ kg) y K (0,12–0,29 cmolc/kg), con Na muy bajo y sin presencia de Al. En cuanto a nutrientes disponibles: el P presentó de bajo a muy bajo (2,70–8,86 mg/kg) y el K disponible de baja a media (46–114 mg/kg). La textura varió de franco arcillo arenoso y franco arcilloso (43–59 % arena; 20–29 % arcilla).

Tabla 2.*Resultados del análisis fisicoquímico de las muestras de suelo y cadmio en hoja*

Genotipo	Cd suelo	Cd hojas	pH	CE	CaCO ₃	MO	N	P	K	CIC	CICe	Ca	Mg	K	Na	SB	Arena	Limo	Arcilla	Clase textural
				dS/cm	%	mg/kg			cmolc/kg					%						
CCN51	0,5	2,56	6,1	0,02	<0,3	2,10	0,10	2,89	46,00	16,94	10,34	9,43	0,73	0,12	0,07	61,03	59,36	20,00	20,64	FraArc Are
ICS 95	0,37	1,35	5,9	0,03	<0,4	2,15	0,11	8,86	62,00	16,98	11,78	1,54	0,98	0,16	0,10	69,37	51,36	28,00	20,64	Fra
Hibrido	0,40	1,36	6,1	0,02	<0,5	2,35	0,12	2,70	114,00	23,11	18,11	16,11	1,65	0,29	0,06	78,37	43,36	28,00	28,64	Fra- Arc

4.1.2. Concentración de Cd en suelo de tres genotipos de cacao (*T.cacao*) en una plantación orgánica

En la Tabla 3 se muestran los resultados de la Prueba de Kruskal Wallis, realizada a la concentración de Cd en suelo de tres genotipos de cacao orgánico

Tabla 3.

Prueba de medianas por Kruskal-Wallis para la concentración de Cd en suelo de tres genotipos de cacao orgánico.

N ^o Item	Genotipo	Cd suelo $\mu\text{g g}^{-1}$	Media	D.E	Mediana
1	CCN 51	0,50			
2	CCN 51	0,60			
3	CCN 51	0,40	0,50	0,10	0,50
1	ICS 95	0,40			
2	ICS 95	0,30			
3	ICS 95	0,40	0,40	0,10	0,40
1	HIBRIDO	0,40			
2	HIBRIDO	0,50			
3	HIBRIDO	0,30	0,37	0,06	0,40

H:2,60 y P: 0,3643

D.E: Desviación estándar H: Estadístico de la prueba de Kruskal-Wallis P: Valor de significancia estadística

No se detectaron diferencias estadísticamente significativas entre los genotipos ($p > 0,05$).

Los resultados de la prueba de Kruskal-Wallis para el cadmio en suelo arrojaron un valor de $p=0,3643$, lo que indica que no existen diferencias estadísticamente significativas en las concentraciones de cadmio del suelo entre las parcelas donde crecen los tres genotipos evaluados (CCN 51, HÍBRIDO, ICS 95). Este resultado es metodológicamente importante por varias razones:

4.1.3. Concentración de Cd en hojas de tres genotipos de cacao (*T. cacao*) en una plantación orgánica.

Los resultados de la Prueba no paramétrica de Kruskal & Wallis se muestran en la Tabla 4

Tabla 4.

Prueba de medianas por Kruskal Wallis para la concentración de Cd en hojas de tres genotipos de cacao orgánico.

N ^o Item	Genotipo	Cd suelo $\mu\text{g g}^{-1}$	Media	D.E	Mediana
1	CCN 51	2,38			
2	CCN 51	2,78			
3	CCN 51	2,52	2,56	0,20	2,52
1	ICS 95	1,36			
2	ICS 95	1,32			
3	ICS 95	1,36	1,36	0,18	1,41
1	HIBRIDO	1,41			
2	HIBRIDO	1,51			
3	HIBRIDO	1,16	1,35	0,02	1,36

H:5,60 y P:0,0286

D.E: Desviación estándar H: Estadístico de la prueba de Kruskal-Wallis P: Nivel de significancia estadística, Valores expresados en la misma unidad de concentración de Cd ($p < 0,05$) indica diferencias significativas entre genotipos

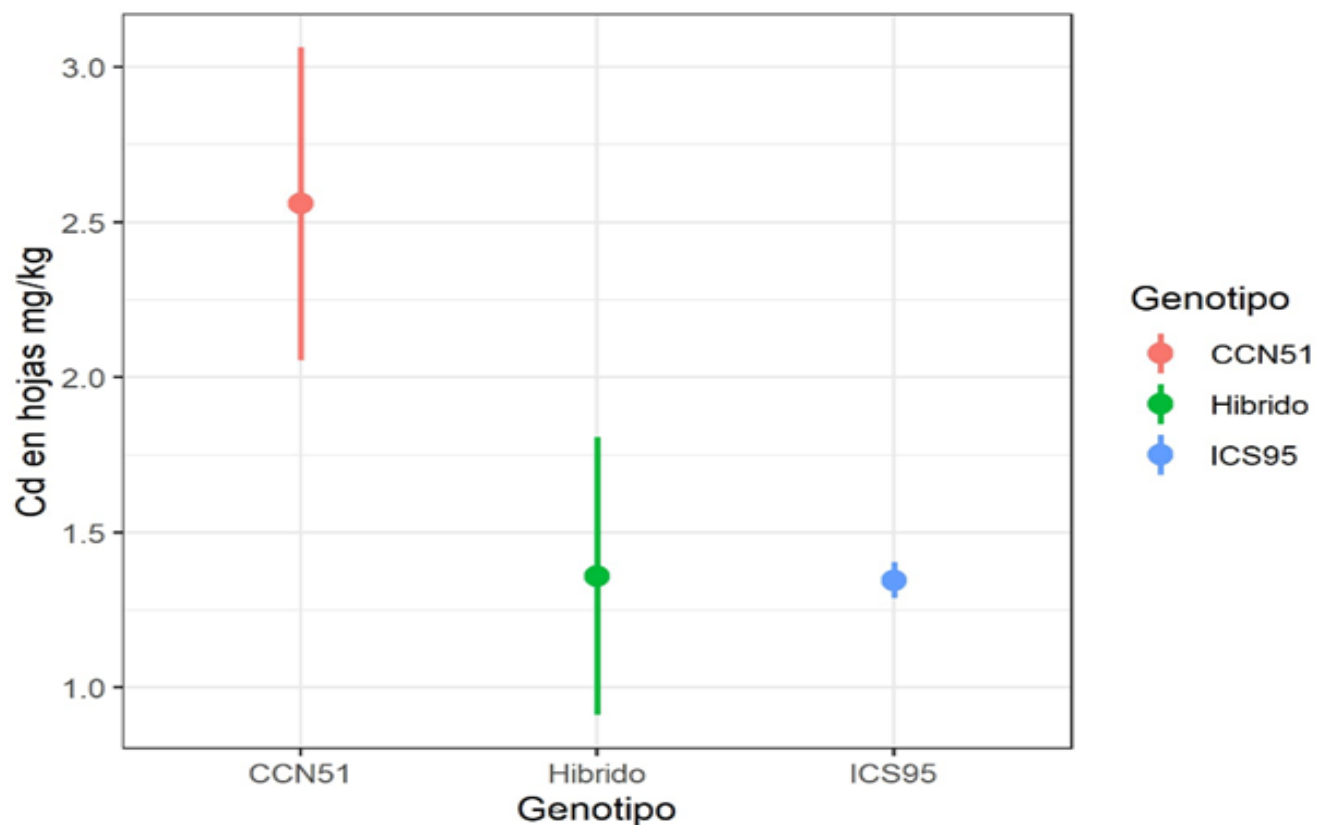
En contraste con los resultados del suelo, la prueba de Kruskal-Wallis para el cadmio en hojas arrojó un valor de $p=0,0286$, lo que indica diferencias estadísticamente significativas entre los tres genotipos al nivel $\alpha=0,05$. Este resultado es de gran relevancia científica y práctica, ya que permite rechazar la hipótesis nula de igualdad de medianas y concluir que al menos uno de los tres genotipos difiere significativamente de los demás en la concentración foliar de cadmio.

En la figura 3, se presentan los resultados de la concentración media de Cd en hojas, donde el genotipo CCN 51 ($2,56 \mu\text{g g}^{-1}$) acumula significativamente más Cd que ICS 95 ($1,35 \mu\text{g g}^{-1}$) y el Híbrido ($1,36 \mu\text{g g}^{-1}$). Por su parte, el ICS 95 y el híbrido presentan niveles similares de Cd en hojas, sin diferencias significativas entre sí.

Estos resultados, han demostrado que, la capacidad del genotipo CCN 51 para acumular casi el doble de Cd en hojas en comparación con los otros genotipos, el ICS 95 y el híbrido mostraron comportamientos similares y significativamente

Figura 3

Intervalos de confianza al 95% (IC:95) de la concentración de Cd en las hojas de tres genotipos de cacao orgánico



G1:CN51= 2,6 mg/kg. G2: Híbrido=1,4. G3:ICS 95=1,35

4.1.4. Correlación entre la concentración de Cd en el suelo en los tres genotipos de cacao (*T. cacao*) en una plantación orgánica.

La Tabla 5 muestra la correlación de Spearman obtenida en el estudio. Entre los principales resultados se destaca la relación suelo-planta la acumulación de Cd en el suelo y las hojas con los factores más relevantes en los tres genotipos de cacao cultivados en una plantación orgánica del distrito de Yurimaguas, descritos a continuación:

Tabla 5.

Coefficiente de correlación de Spearman la concentración de Cd en el suelo y las hojas con los factores que se relacionan en los tres genotipos de cacao orgánico.

Parámetros	Cd Suelo ($\mu\text{g g}^{-1}$)	Cd Hojas ($\mu\text{g g}^{-1}$)
Cd Suelo ($\mu\text{g g}^{-1}$)	1,00	0,72
Cd Hojas ($\mu\text{g g}^{-1}$)	0,72	1,00
pH	0,43	0,5
CE	-0,43	-0,5
CaCO ₃	-0,46	-0,85
MO	-0,28	-0,63
N	-0,45	-0,84
P	-0,42	-0,47
K	-0,3	-0,66
CIC	-0,17	-0,48
CICef	-0,27	-0,62
Ca	-0,26	-0,61
Mg	-0,32	-0,69
Na	-0,31	-0,28
Sat Bas	-0,44	-0,83
Arena	0,45	0,84
Limo	-0,6	-0,98
Arcilla	-0,17	-0,48

Se observó una asociación positiva y muy fuerte entre Cd en el suelo y Cd en las hojas ($r = 0,72$), lo que indica que, a mayor concentración de Cd en el suelo, mayor es su acumulación en el tejido foliar.

Con respecto a las propiedades de textura arenosa, muestro una correlación positiva con Cd en suelo y hojas; en arcilla y limo, presento correlaciones negativas, lo que indica una mayor retención de Cd.

La correlación entre los niveles de Cd y la conductividad eléctrica (C.E.) del suelo fue de $r = -0,43$, lo que indica una relación negativa moderada. La conductividad eléctrica, vinculada a la proporción de sales solubles en el suelo, podría influir en la solubilidad y la movilidad del Cd, promoviendo su reducción a medida que aumenta dicha conductividad.

La interpretación del nivel de Cd en el suelo con los aspectos que pueden influenciar fue la siguiente:

- El Cd en el suelo parece estar significativamente influenciado por la materia orgánica, el pH, el nitrógeno, el potasio.
- La textura del suelo es un factor crítico, ya que las arcillas tienden a presentar una mayor capacidad de retención de Cd que las arenas.
- La correlación negativa con el pH, el potasio y la materia orgánica sugiere que los suelos más alcalinos, ricos en potasio o en materia orgánica pueden reducir la capacidad acumulada de Cd en el suelo, mientras que los suelos ácidos o de baja materia orgánica podrían ser más propensos a retener o liberar más Cd.
- El fósforo podría influir en la biodisponibilidad del Cd en el suelo, mostrar una correlación positiva con el Cd.

Los resultados confirman que la textura arenosa y la baja MO son factores que más favorecen a la movilidad del Cd y que los suelos más arcillosos y con mejor fertilidad retienen la movilidad del Cd.

4.2. **Discusión de resultados**

4.2.1 De las características físico-químicas del suelo

La prueba no paramétrica realizada a la concentración de cadmio en el suelo mostró un nivel de significancia $\alpha=0,05$, un valor $p=0,3643$ ($p >0,05$), no se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre las medianas de los grupos a evaluar, por lo que no se rechazar la hipótesis nula; no significa que las medianas sean iguales. En términos prácticos, esto indica que las diferencias observadas en las concentraciones de Cd del suelo entre los tres genotipos no representan diferencias sistemáticas (Conover,1999).

La ausencia de diferencias significativas en el Cd del suelo es un hallazgo positivo desde la perspectiva del diseño experimental, ya que indica que los tres genotipos están creciendo en condiciones edáficas comparables en cuanto a la disponibilidad de cadmio.

La prueba de Kruskal-Wallis resultó particularmente apropiada para datos de concentración de metales en suelos, que con frecuencia no cumplen los supuestos de normalidad requeridos por la ANOVA paramétrica (Kutner et al., 2005). La variabilidad espacial del cadmio en suelos agrícolas puede ser considerable incluso a escalas pequeñas, debido a factores como heterogeneidad del material parental, historia de aplicación de enmiendas, y procesos de lixiviación diferencial (Guarin et al., 2023; Adriano, 2001). El resultado no significativo sugiere que, a pesar de esta variabilidad inherente, las parcelas experimentales son suficientemente homogéneas en cuanto a Cd del suelo.

La acumulación de Cd en el suelo es un factor crítico para la salud de los cultivos de cacao, ya que influye en la bioacumulación de dicho metal pesado, lo que potencialmente afecta su desarrollo (García Porras et al., 2025; Ortiz-Álvarez et al., 2023). En este contexto, diversos aspectos edáficos como los nutrientes (potasio, nitrógeno, fósforo), (MO) el pH y la (CE) y la

textura del suelo (arcilla, arena, limo) interactúan de manera compleja, afectando la disponibilidad y toxicidad del Cd (Iffat Alam et al., 2020).

En suelos ligeramente ácidos ($\text{pH} \approx 6$), la actividad del Cd^{2+} en solución disminuye por incremento de sitios de intercambio cargados negativamente y mayor competencia catiónica (Ca^{2+} , Mg^{2+}), efectos favorecidos por la CEC y la saturación de bases observadas. La ausencia de Al^{3+} intercambiable descarta la presencia de acidez activa que incremente la desorción de Cd. No obstante, la MO relativamente baja ($\sim 2\%$) y el mayor porcentaje de arena (hasta 59%) reducen la capacidad de complejación/adsorción, lo que puede aumentar la fracción disponible. Adicionalmente, el P disponible muy bajo limita la formación de complejos/fases fosfatadas con Cd, lo que podría elevar la transferencia suelo-planta. En conjunto, el gradiente esperado de disponibilidad de Cd fue: $\text{CCN51} > \text{ICS95} > \text{Híbrido}$, hipótesis que debe contrastarse con los datos de Cd-DTPA/Mehlich y de Cd foliar.

Estos resultados sugieren un suelo que no es extremadamente ácido; presenta condiciones favorables para la movilidad del Cd, principalmente por la baja MO y el alto contenido de arena (Rofner et al., 2018). Las mejores condiciones de inmovilización se observaron en el lote del híbrido mostró el ambiente edáfico menos propenso a disponibilidad de Cd, seguido por ICS 95 y CCN 51 (Cristancho et al., 2011)

Concentración de Cd en suelo de tres genotipos de cacao en una plantación orgánica.

La evaluación de los niveles de Cd en el suelo asociado a tres genotipos de cacao orgánico (CCN51, ICS95 y Híbrido) en una plantación en Yurimaguas no mostró diferencias estadísticamente significativas entre los genotipos ($p > 0,05$). Estos hallazgos indican que las divergencias observadas en las medias de concentración de Cd pueden deberse al azar y no a características inherentes de los genotipos evaluados (Vela, 2023).

El genotipo CCN51 mostró el mayor nivel promedio de Cd en el suelo ($0,50 \mu\text{g g}^{-1}$), seguido del Híbrido ($0,40 \mu\text{g g}^{-1}$) y ICS95 ($0,37 \mu\text{g g}^{-1}$), que reveló que estas diferencias no son estadísticamente significativas (Guimac Cedillo & Verástegui Huanca, 2022).

La ausencia de diferencias significativas puede deberse a varios factores, incluidas la uniformidad de las condiciones edafoclimáticas en la plantación y la capacidad similar de los genotipos para interactuar con el Cd existente en el suelo. Estudios previos han señalado que la dinámica del Cd en suelos de cacao está influenciada por variables como la materia orgánica, la textura y el pH del suelo, más que por las características genéticas de las plantas (Patiño Torres & Julca Otiniano, 2021). Esto podría explicar por qué, a pesar de las diferencias en el diámetro y vigor de los genotipos, el nivel de Cd en el suelo no mostró variaciones significativas.

Es importante destacar que el contenido de Cd observado en los suelos de esta investigación se ubica debajo del límite máximo aceptable para suelos agrícolas, en concordancia con la normativa de la OMS (Organización Mundial de la Salud), que establece un umbral de $1,0 \mu\text{g g}^{-1}$ para Cd en suelos agrícolas (Chimbo et al., 2022; World Health Organization, 2019). Esto resalta que, aunque no se identificaron diferencias significativas entre genotipos, las prácticas orgánicas implementadas en la plantación podrían estar contribuyendo a mantener niveles seguros de Cd en el suelo (Chupillón Cubas, 2017; Cordova-Lazo et al., 2024).

Los suelos alrededor del genotipo CCN51, mostro una concentración de $0,50 \mu\text{g g}^{-1}$ de Cd, podría estar experimentando una mayor exposición a este metal pesado en comparación con los otros dos genotipos en estudio. Aunque la acumulación de Cd es relativamente baja, esta cifra podría ser significativa en su efecto sobre el desarrollo de las plantaciones, especialmente si el Cd es asimilado directamente en las raíces y trasladadas a las hojas, podría inhibir la fotosíntesis y otras funciones fisiológicas (Singh et al., 2016).

Para el genotipo ICS95, se encontró un nivel de Cd en el suelo de $0,37 \mu\text{g g}^{-1}$, la más baja entre los tres. Esto podría indicar que ICS95 es el menos expuesto al Cd, lo que podría traducirse en una mejor tolerancia y, posiblemente, un mejor crecimiento en condiciones de contaminación por Cd en el suelo. Es relevante mencionar que la calidad de asimilación de metales pesados cambia entre genotipos y especies, y esto podría ser un factor que influye en su desarrollo (Borjas-Ventura et al., 2022).

La acumulación de Cd en los suelos agrícolas podría tener resultados perjudicial en las plantas de cacao, ya que este metal es conocido por su toxicidad. En investigaciones anteriores, han determinado que el Cd puede acumularse en las raíces de las plantas y, en altas concentraciones, afectar negativamente la calidad del cacao y su rendimiento (Arévalo- Gardini et al., 2017). Por ejemplo, investigaciones han demostrado que la exposición al Cd reduce la actividad fotosintética y limita el desarrollo del cultivo en suelos contaminados (Haider et al., 2021). Además, la bioacumulación de Cd en cultivos de cacao puede estar asociada con la transferencia de este metal a los granos, lo cual es una preocupación significativa para la calidad del cacao orgánico y la salud humana (Borjas- Ventura et al., 2022).

El comportamiento observado en los genotipos de cacao en este estudio coincide con hallazgos previos que sugieren que los genotipos de cacao tienen una capacidad variable para tolerar la presencia de Cd en el suelo (Borjas-Ventura et al., 2022). El genotipo ICS95, al presentar la menor concentración de Cd, podría estar mostrando una mayor eficiencia en la regulación de este metal, mientras que CCN51, con la concentración más alta de Cd, podría estar enfrentando mayores riesgos de acumulación, lo que podría comprometer su rendimiento a largo plazo.

4.2.2 Concentración de Cd en hojas de tres genotipos de cacao en una plantación orgánica.

El estudio de la acumulación de Cd en hojas de tres genotipos de cacao orgánico (CCN51, ICS95 y Híbrido) en Yurimaguas mostró entre los genotipos evaluados diferencias significativas ($p = 0,0025$), lo que indica que el volumen de Cd en las hojas está influenciado por la genética de la planta. El modelo presentó una varianza explicada significativa ($F = 33,19$), esto sugiere que la selección del genotipo es un factor clave en la asimilación y acumulación de Cd en hojas de cacao (López-Ulloa et al., 2021).

La magnitud del valor p (cercano, pero claramente por debajo del umbral de 0,05) sugiere una diferencia real, aunque no extremadamente pronunciada, lo cual es consistente con la naturaleza cuantitativa de los rasgos de acumulación de metales, que típicamente muestran variación continua en lugar de diferencias categóricas (Lewis et al., 2018; Lynch y Walsh, 1998).

La presencia de diferencias significativas en Cd foliar, en ausencia de diferencias en Cd del suelo, indica claramente que los genotipos difieren en su capacidad intrínseca de absorción radicular y/o de translocación del cadmio desde las raíces hacia los tejidos aéreos. Este patrón es consistente con el concepto de variación genotípica en la eficiencia de absorción y transporte de metales, ampliamente documentado en la literatura sobre fitorremediación y fitoextracción (Clemens, 2001; Krämer, 2010).

Desde una perspectiva aplicada, este resultado confirma que la selección de genotipos es una estrategia viable para disminuir la acumulación de cadmio en tejidos de cacao, incluso cuando las concentraciones del metal en el suelo no pueden modificarse fácilmente (Arévalo-Hernández et al., 2021).

Las hojas de cacao, aunque no son el producto comercial final, son indicadores importantes del estatus de cadmio en la planta y se correlacionan con la acumulación en granos, aunque la

relación no es necesariamente lineal debido a procesos de redistribución vía floema (Blommaert et al. 2022; Vanderschueren et al., 2023).

El genotipo CCN51 presentó una concentración significativamente mayor de Cd en hojas ($2.56 \mu\text{g g}^{-1}$), diferenciándose estadísticamente de ICS95 ($1.35 \mu\text{g g}^{-1}$) y Híbrido ($1.36 \mu\text{g g}^{-1}$), los cuales no mostraron diferencias significativas entre sí. Estos hallazgos sugieren que CCN51 aparentemente posee una mayor concentración de Cd en sus hojas en relación con los otros genotipos. Esta diferencia podría estar relacionada con mecanismos fisiológicos específicos de absorción y translocación de Cd dentro de la planta, como fue reportado en investigaciones previas (Correa et al., 2021).

Investigaciones anteriores han señalado que los niveles de Cd en cacao son influenciados por la interacción entre el genotipo y los factores ambientales como la disponibilidad del pH del suelo, la materia orgánica y la concentración de Cd en la rizosfera (Borjas-Ventura et al. (2022); Wade et al. (2022)). Bajo este contexto, la menor acumulación de Cd en hojas de ICS95 y el Híbrido podría deberse a mecanismos de exclusión o una menor translocación del metal iniciando en las raíces y luego hacia la copa de la plantación.

Estos resultados tienen implicaciones importantes para la producción de cacao en sistemas orgánicos, ya que la acumulación de Cd en hojas puede estar correlacionada con su presencia en los granos, lo que grafica un riesgo para la comercialización del producto en mercados internacionales con regulaciones estrictas sobre la existencia de metales pesados en productos alimenticios (Matyjaszczyk & Schumann, 2018).

La concentración de cd en plantas es un tema ampliamente estudiado debido a los efectos tóxicos que puede tener sobre la fisiología vegetal. Según Engbersen et al. (2019), el Cd interfiere con varios procesos metabólicos, incluyendo la fotosíntesis, y puede inducir fatiga oxidativa en las

plantas, que afecta su rendimiento y crecimiento. En cacao, la acumulación de Cd en las hojas se ha asociado con un rendimiento reducido y una menor calidad en los granos (Arévalo-Gardini et al., 2017; Guarín et al., 2024). De acuerdo con investigaciones previas, algunos genotipos de cacao tienen una mayor capacidad para resistir la acumulación de metales pesados, lo que podría explicar por qué los genotipos ICS95 y Híbrido presentan acumulaciones muy menores de Cd en las hojas en comparación con CCN51.

Además, el comportamiento observado en CCN51 podría reflejar una mayor susceptibilidad a la acumulación de Cd, lo que podría estar relacionado con una menor capacidad para bloquear la absorción o translocación del metal a través de las raíces y hacia las hojas (Ortiz-Álvarez et al., 2023). Esta diferencia en la acumulación foliar de Cd subraya la importancia de seleccionar genotipos de cacao con menor tendencia a acumular metales pesados, especialmente en áreas de cultivo donde los suelos pueden estar contaminados (Aguirre-Forero et al., 2020).

4.2.3 Correlación de la concentración de Cd en el suelo con otros factores en tres genotipos de cacao, en una plantación orgánica.

En el pH se observó una correlación positiva con el Cd, lo que indica que los suelos más ácidos favorecen una mayor movilidad y disponibilidad del Cd (Florida Rofner et al., 2018).

La MO mostró una correlación negativa, aunque débil, lo que sugiere una menor disponibilidad de Cd en suelos con mayor MO (Oliva et al., 2020).

Los nutrientes P, N, K, Ca y Mg mostraron correlaciones negativas con el Cd, lo que sugiere que los suelos más fértiles disminuyen la disponibilidad del Cd (Zhu et al., 2020).

La correlación negativa moderada (-0,50) entre la acumulación de Cd en el suelo y el pH indica que los suelos más ácidos favorecen una mayor disponibilidad de Cd. Esto es coherente con

estudios previos que han demostrado que el Cd es más soluble en suelos ácidos, lo que facilita su asimilación por las raíces de las plantaciones (Gramlich et al. (2018) y Villalaz-Pérez et al. (2024)). En suelos ácidos, los iones de hidrógeno (H^+) pueden reemplazar los cationes metálicos como el Cd en las áreas de la capacidad de intercambio catiónico (CIC), liberando más Cd en la estructura del suelo y, por lo tanto, aumentando su biodisponibilidad. Por lo tanto, un pH más bajo podría aumentar la toxicidad del Cd en suelos agrícolas (Scaccabarozzi et al., 2020)

Según Rosales-Huamani et al. (2020) y Scaccabarozzi et al. (2020), en las áreas de cultivo de cacao, los suelos ácidos (por la alta precipitación y la lixiviación) favorecen la movilización del Cd y otros metales pesados, incrementa su acumulación en la textura del suelo y aumenta su bioacumulación en las plantas; sin embargo, algunas investigaciones han mostrado que los suelos con pH ligeramente ácido pueden tener una menor solubilidad del Cd, especialmente en suelos ricos en materia orgánica, que pueden formar complejos estables con el Cd, reduciendo su disponibilidad

Investigaciones realizadas en la Amazonía peruana, como las de Borjas-Ventura et al. (2022) y Ortiz-Álvarez et al. (2023), confirman que, en los suelos de cacao, una alta cantidad de MO reduce la acumulación del Cd incluido los metales pesados. Afirman que la MO ayuda a estabilizar el Cd, reduciendo su movilidad en el suelo, que disminuye su asimilación en las plantas; No obstante, Chávez et al. (2015) sugieren que, en suelos amazónicos muy lixiviados, la MO no siempre tiene un impacto significativo en la retención de Cd. En estos suelos, donde la actividad biológica es más alta debido a las condiciones climáticas, los metales pesados pueden ser movilizados por procesos biológicos a pesar de la existencia de materia orgánica.

Gutiérrez et al. (2022) obtuvieron que, en suelos con alta concentración de Cd, las plantas de cacao mostraban deficiencias en nitrógeno y fósforo. Estos autores indican que el Cd competía con estos nutrientes en las raíces, lo que reducía la efectividad de la plantación para absorberlos;

sin embargo, la mayoría de las investigaciones muestran una interferencia entre el Cd y la absorción de nitrógeno y fósforo, estudios de Aguirre-Forero et al. (2020); García Carrión (2009) y Tang et al. (2021) concluyen que la capacidad de las plantas para asimilar estos nutrientes no se ve gravemente afectada a concentraciones menores de Cd, especialmente en suelos ricos en nutrientes, donde los mecanismos de absorción podrían ser más eficientes.

García Porras et al. (2025) y Ortiz-Álvarez et al. (2023) reportaron que el Cd, al interferir con la absorción de potasio, afectaba el rendimiento y la fotosíntesis de los cultivares de cacao. Los suelos, especialmente los ácidos, favorecen esta competencia, lo que reduce la eficiencia del cacao en la asimilación de nutrientes esenciales; sin embargo, (Meter et al., 2019) argumentan que, en algunos suelos de cacao, la acumulación de Cd no parece influir gravemente en la asimilación de potasio, en las plantas que desarrollan procesos de tolerancia a través de la excreción de iones competidores, lo que minimiza los efectos de la competencia entre estos dos elementos.

Aguirre-Forero et al. (2020) y Rosales-Huamani et al. (2020) confirmaron que, en suelos con alta C.E., la solubilidad aumenta en los metales pesados como en el Cd, que facilita su absorción en las plantas de cacao. Este fenómeno es particularmente evidente en suelos con alta salinidad, donde los iones favorecen la movilidad de los metales,

Meter et al. (2019); Villalaz-Pérez et al. (2024) han observado que los suelos arcillosos tienen una mayor capacidad para retener metales pesados debido a la CIC, lo que limita el traslado del Cd y reduce su disponibilidad para las plantas agrícolas; no obstante, Meter et al. (2019) y Rosales- Huamani et al. (2020) indican que la textura del suelo por sí sola no siempre determina la biodisponibilidad del Cd, especialmente si otras variables, como la presencia de materia orgánica y la acidez del suelo, logran mayor impacto en la retención de metales pesados.

Diversos trabajos demostraron la predominancia de estos factores en la dinámica del Cd en los suelos. Según Oliveira et al. (2022), el Cd es más disponible en suelos ácidos, lo que podría hacer que las plantas sean más susceptibles a la absorción del metal. Borjas-Ventura et al. (2022); Ortiz-Álvarez et al. (2023) también señalan que la materia orgánica tiene un rol fundamental en la mitigación de la toxicidad del Cd, formando complejos con este metal y reduciendo su movilidad. Además, Yadav (2010) discute cómo el nitrógeno y el fósforo son competidos por el Cd en el suelo, que puede perjudicar el rendimiento y crecimiento de las plantaciones.

CONCLUSIONES

Basándonos en los resultados y la discusión presentados, las conclusiones de esta investigación serían:

1. Las concentraciones de Cd en el suelo no presentaron diferencias estadísticamente significativas entre los tres genotipos evaluados, lo que confirma que crecieron bajo condiciones edáficas comparables. Todas las concentraciones se mantuvieron por debajo límite máximo permisible de Cd en suelos agrícolas, según los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) establecidos por el Ministerio del Ambiente (MINAM), es de 1,4 mg/kg que sugiere que las prácticas orgánicas contribuyen a mantener niveles seguros.
2. El análisis de cadmio en hojas mostro diferencias estadísticamente significativas entre genotipos ($p = 0,0286$), siendo CCN 51 el de mayor acumulación foliar, casi el doble de lo observado en el ICS 95 y el Híbrido. Esto demuestra diferencias genotípicas intrínsecas en la capacidad de absorción y translocación de Cd, posicionando a ICS 95 y al Híbrido como genotipos más apropiados para la producción orgánica en suelos con presencia de cadmio.
3. El análisis de correlación identificó una asociación positiva y fuerte entre el Cd del suelo y el Cd foliar ($r = 0,72$). La textura arenosa favoreció la movilidad del Cd ($r = 0,84$), mientras que el limo ($r = -0,98$) y la arcilla ($r = -0,48$) la retrasaron. La materia orgánica ($r = -0,63$) y los nutrientes esenciales ($r = -0,47$ a $-0,84$) mostraron correlaciones negativas, lo que indica que los suelos con mayor fertilidad reducen la biodisponibilidad del cadmio.
4. La selección genotípica emerge como una estrategia efectiva de mitigación: ICS 95 y el Híbrido reducen significativamente el riesgo de contaminación en los granos. El incremento de la materia

orgánica, la corrección del pH y la adecuada fertilización pueden reducir la biodisponibilidad del Cd. Se recomienda implementar programas de monitoreo periódico, especialmente en genotipos de alta acumulación, como el CCN 51.

5. Existen diferencias genotípicas significativas en la capacidad de acumulación foliar de cadmio en cacao orgánico, siendo CCN 51 de mayor riesgo e ICS 95 y el Híbrido alternativas más seguras.

Los factores edáficos modulan la disponibilidad del Cd, por lo que el manejo integrado del suelo y la selección genotípica constituyen pilares fundamentales para la producción de cacao inocuo y competitivo en mercados internacionales exigentes.

RECOMENDACIONES

Basándome en los resultados y conclusiones de esta investigación, se proponen las siguientes recomendaciones:

1. Se recomienda priorizar la siembra de los genotipos ICS 95 y el Híbrido en plantaciones nuevas o renovaciones de cacao orgánico en la región de Yurimaguas y zonas con características edáficas similares, debido a su menor capacidad de acumulación foliar de cadmio (1,35-1,36 $\mu\text{g g}^{-1}$). Para plantaciones existentes con predominancia de CCN 51, se sugiere implementar estrategias de injertación o reemplazo gradual con genotipos de baja acumulación, considerando además programas de monitoreo intensivo de cadmio en granos para garantizar el cumplimiento de normativas internacionales.
2. Implementar prácticas integradas de manejo agronómico orientadas a reducir la biodisponibilidad del cadmio en el suelo, incluyendo: aplicación periódica de enmiendas orgánicas (compost, humus, residuos de cosecha) para incrementar el contenido de materia orgánica por encima del 3%, encalado controlado para ajustar el pH entre 6,5 y 7,0, y fertilización balanceada con énfasis en calcio, magnesio y potasio para promover la competencia catiónica. Estas prácticas deben adaptarse a las condiciones específicas de textura y fertilidad de cada parcela.
3. Establecer un programa regional de monitoreo sistemático de cadmio en suelo, hojas y granos de cacao en plantaciones comerciales, con frecuencia mínima anual y análisis diferenciado por genotipo. Este programa debe incluir caracterización físico-química completa del suelo (pH,

MO, textura, CIC, nutrientes), evaluación de la relación suelo-planta-grano, y desarrollo de modelos predictivos de acumulación específicos para las condiciones amazónicas, permitiendo la identificación temprana de áreas de riesgo y la implementación de medidas correctivas oportunas.

4. Realizar investigaciones complementarias que evalúen: (a) la concentración de cadmio en granos de los tres genotipos y su correlación con niveles foliares y de suelo; (b) el efecto de diferentes sistemas de manejo (orgánico vs. convencional, con y sin sombra) sobre la dinámica del Cd; (c) la evaluación de otros genotipos promisorios y materiales híbridos; y (d) la implementación de tecnologías de remediación (fitorremediadoras, biochar, zeolitas) validadas en condiciones locales. Adicionalmente, se sugiere incorporar en programas de mejoramiento genético el criterio de baja acumulación de cadmio como característica deseable.
5. Desarrollar e implementar programas integrales de capacitación, certificación y transferencia tecnológica dirigidos a productores de cacao orgánico, enfatizando en: selección adecuada de genotipos, prácticas de manejo del suelo que reducen la biodisponibilidad del metal, importancia del cumplimiento de normativas internacionales, y sistemas de trazabilidad. Estos programas deben estar respaldados por alianzas estratégicas entre instituciones de investigación, cooperativas de productores, entidades gubernamentales y organismos certificadores, promoviendo la diferenciación de mercado mediante sellos de calidad que garanticen la inocuidad del producto y faciliten el acceso a mercados premium internacionales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adriano, D. C. (2001). Bioavailability of trace metals. *In Trace elements in terrestrial environments: Biogeochemistry, bioavailability, and risk of metals* (pp. 61–89). Springer. https://doi.org/10.1007/978-0-387-21510-5_3
- Aguirre-Forero, S. E., Piraneque-Gambasica, N. V., & Vásquez-Polo, J. R. (2020). *Heavy metals content in soils and cocoa tissues in Magdalena department Colombia: Emphasis in cadmium*. **Entramado**, **16**(2), 298–310. <https://doi.org/10.18041/1900-3803/entramado.2.6753>
- Alloway, B. J. (Ed.). (2013). *Heavy metals in soils: Trace metals and metalloids in soils and their bioavailability* (3rd ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-4470-7>
- Álvarez Morales, E. L., Guillin Llanos, X. M., & Rodríguez Angulo, D. E. (2021). *Análisis de los efectos que produce la presencia del cadmio en el cultivo de cacao (Theobroma cacao)*. **Ingeniería e Innovación**, **9**(2). <https://doi.org/10.21897/23460466.2723>**
- Arévalo-Gardini, E., Arévalo-Hernández, C. O., Baligar, V. C., & He, Z. L. (2017). *Heavy metal accumulation in leaves and beans of cacao (Theobroma cacao L.) in major cacao growing regions in Peru*. *Science of the Total Environment*, 605–606, 792–800. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.06.122>
- Arévalo-Gardini, E., Obando-Cerpa, M. E., Zúñiga-Cernades, L. B., Arévalo-Hernández, C. O., Baligar, V., & 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://doi.org/10.21704/rea.v15i2.747>

Arévalo-Gardini, E., Meinhardt, L. W., Zúñiga, L. C., Arévalo-Gardni, J., Motilal, L., & Zhang, D. (2019). *Genetic identity and origin of “Piura Porcelana”—a fine-flavored traditional variety of cacao (Theobroma cacao) from the Peruvian Amazon. Tree Genetics & Genomes, 15(1),*

Article 11. <https://doi.org/10.1007/s11295-019-1316>

Arévalo-Hernández, C. O., Arévalo-Gardini, E., Barraza, F., Farfán, A., He, Z., & Baligar, V. C.

(2021). *Growth and nutritional responses of wild and domesticated cacao genotypes to soil Cd stress. Science of the Total Environment, 763, 144021.*

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144021>

Arévalo-Hernández, C. O., Arévalo-Gardini, E., Farfán, A., Amaringo-Gómez, M., Daymond,

A., Zhang, D., & Baligar, V. C. (2022). *Growth and nutritional responses of juvenile wild and domesticated cacao genotypes to soil acidity. Agronomy, 12(12), 3124.*

<https://doi.org/10.3390/agronomy12123124>

Avendaño-Arrazate, C. H., Campos-Rojas, E., López-Palestina, C. U., Martínez-Bolaños, M.,

Caballero-Pérez, J. F., Báez-Alonso, M., Ariza-Flores, R., & Cadena-Iñiguez, J. (2021). *Antioxidant activity in genotypes of Theobroma spp. (Malvaceae) in Mexico. Revista de*

Biología Tropical, 69(2), 507–523. <https://doi.org/10.15517/rbt.v69i2.41626>

Barrezueta-Unda, S., Armijos-Galarza, I. A., & Vega-Mora, E. A. (2021). *Comparación de*

niveles de cadmio en hojas, testa y almendra en cultivares de Theobroma cacao. Ciencia

Unemi, **14**(37), 73–80.

<https://doi.org/10.29076/issn.2528-7737vol14iss37.2021pp73-80p>

Blommaert, H., Aucour, A.-M., Wiggerhauser, M., Moens, C., Telouk, P., Campillo, S., Beauchêne, J., Landrot, G., Testemale, D., Pin, S., Lewis, C., Umaharan, P., Smolders, E., & Sarret, G. (2022). *From soil to cacao bean: Unravelling the pathways of cadmium translocation in a high Cd accumulating cultivar of Theobroma cacao L.* **Frontiers in Plant Science**, **13**, 1055912. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1055912>

Bonomelli, C., Bonilla, C. A., & Valenzuela, A. (2003). *Efecto de la fertilización fosforada sobre el contenido de cadmio en cuatro suelos de Chile.* **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, **38**(10), 1179–1186. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2003001000007>

Borjas-Ventura, R., Bello-Medina, N., Bello-Amez, S., Alvarado-Huamán, L., Rebaza-Fernandez, D., Tapia y Figueroa, L., Castro-Cepero, V., & Julca-Otiniano, A. (2022). *Differentiated cadmium uptake and its effect on the physiology of six cacao genotypes (Theobroma cacao L.) in San Ramón, central Peruvian jungle.* **Tropical and Subtropical Agroecosystems**, **25**(3). <https://doi.org/10.56369/TSAES.4000>

Broncano Seminario, M. A., Castro Nureña, M. C., Casanova Huiman, S. J., Rivera Quintana, N., & Saldaña Tantaleán, S. E. (2024). *Estudio de investigación sectorial de cacao y sus derivados* (1.^a ed., Vol. 1). Ministerio de la Producción.

Cristancho, J. A., Hanafi, M. M., Omar, S. R. S., & Rafii, M. Y. (2011). *Alleviation of soil acidity improves the performance of oil palm progenies planted on an acid Ultisol.* **Acta Agriculturae Scandinavica Section B: Soil and Plant Science**, **61**(6), 487–498. <https://doi.org/10.1080/09064710.2010.506448>

Chancay Alcívar, L. F., Delgado Demera, M., & Salas Macías, C. A. (2022). *Cadmio en el cultivo de cacao (Theobroma cacao L.) y sus efectos ambientales*. **La Técnica: Revista de las Agrociencias**, **91**(Edición especial), 91–110. https://doi.org/10.33936/la_tecnica.v0i0.432

Chávez, E., He, Z. L., Stoffella, P. J., Mylavarapu, R. S., Li, Y. C., Moyano, B., & 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>

Chimbo, G., Ramírez, L., Carrillo, K., Bravo, D., Quiroga, R., & Chávez, E. (2022). *Revisión de normativas para límites críticos de nivel de Cd en fertilizantes en el cultivo de cacao* (Producto Técnico No. 9). FONTAGRO.

Chupillón Cubas, J. W. (2017). *Determinación de la absorción de cadmio y plomo en genotipos de cacao (Theobroma cacao L.) para el establecimiento de plantaciones comerciales* (Tesis de grado). Universidad Nacional de San Martín – Tarapoto. <http://hdl.handle.net/11458/2473>

Clemens, S. (2001). *Molecular mechanisms of plant metal tolerance and homeostasis*. *Planta*, **212**(4), 475–486. <https://doi.org/10.1007/s004250000458>

Commission Regulation (EU) No. 488/2014 of 12 May 2014 amending Regulation (EC) No. 1881/2006 as regards maximum levels of cadmium in foodstuffs. *Official Journal of the European Union* (2014).

Codex Alimentarius Commission. (2016, April). *Proposed draft maximum levels for cadmium in cocoa and cocoa-derived products* (Prepared by the Electronic Working Group chaired by Ecuador and co-chaired by Brazil and Ghana). Joint FAO/WHO Food Standards Programme.

- Conover, W. J. (1999). *Practical nonparametric statistics* (3rd ed.). Wiley.
- Cordova-Lazo, E., Farfán-Cobeña, E., González-Carrasco, V. H., Valverde-Durán, S., Tocto-León, J., & Rodríguez-Aguilar, J. (2024). *Concentración de cadmio en suelo, hojas y almendras de cacao en dos plantaciones de la provincia de El Oro*. **Brazilian Journal of Development**, **10**(5), e69533. <https://doi.org/10.34117/bjdv10n5-026>
- Correa, J. E., Ramírez, R., Ruíz, O., & 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>
- De Souza, P. A., Moreira, L. F., Sarmiento, D. H. A., & da Costa, F. B. (2018). **Cacao—Theobroma cacao**. En S. Rodrigues, E. de Oliveira Silva, & E. Sousa de Brito (Eds.), *Exotic Fruits: Reference Guide* (pp. 69–76). Elsevier.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803138-4.00010-1>
- Del Olmo Rodrigo, D. (2017). *Ecotoxicología del cadmio, riesgo para la salud por la utilización de suelos ricos en cadmio (Trabajo de fin de grado, Universidad Complutense de Madrid)*. Repositorio Institucional de la Universidad Complutense de Madrid.
- Evert, T., Atkinson, R., Zavaleta, D., Rodriguez, C., Lastra, S., Yovera, F., Arango, K., Pezo, A., Aguilar, J., Tames, M., Ramos, A., Cruz, W., Cosme, R., Espinoza, E., Chávez, C. R., & Ladd, B. (2023). The distribution of cadmium in soil and cacao beans in Peru. *Science of The Total Environment*, *881*, 163372. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163372>
- Engbersen, N., Gramlich, A., Lopez, M., Schwarz, G., Hattendorf, B., Gutierrez, O., & Schulin, R. (2019). *Cadmium accumulation and allocation in different cacao cultivars*. *Science of the Total Environment*, *678*, 660–670. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.001>

- Florida Rofner, N., Salinas, J., & González Manrique de Lara, T. F.** (2018). *Comportamiento del cadmio y otros indicadores en suelo y almendra de cacao (Theobroma cacao L.), bajo aplicación de compost y NPK. Folia Amazónica, 27(2), 193–202.* <https://doi.org/10.24841/fa.v27i2.461>
- Florida Rofner, N. (2021). *Cadmium in soil and cacao beans of Peruvian and South American origin. Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín, 74(2), 9499– 9515.* <https://doi.org/10.15446/rfnam.v74n2.91107>
- Florida Rofner, N., Claudio Melchor, S. L., & Gómez Bernal, R.** (2018). *El pH y la absorción de cadmio en almendras de cacao orgánico (Theobroma cacao L.) en Leoncio Prado, Huánuco, Perú. Folia Amazónica, 27(1), 1–8.* <https://doi.org/10.24841/fa.v27i1.438>
- García Carrión, L.** (2009). *Informe final de consultoría: Catálogo de cultivares de cacao (Vol. 1).* Ministerio de Agricultura, Dirección de Promoción de la Competitividad.
- García Porras, G. A., Santos, J. A. d., Carvalho, M. R. d., Pinzón-Sandoval, E. H., Pereira, A. A. S., & Guilherme, L. R. G.** (2025). *Addressing Cadmium in Cacao Farmland: A Path to Safer, Sustainable Chocolate. Agriculture, 15(4), 433.* <https://doi.org/10.3390/agriculture15040433>
- García Ríos, J. N.** (2019). *Comparación de la concentración de cadmio en plantaciones de cacao en los distritos de Huicungo y San Martín de Alao (Tesis de licenciatura).* Universidad César Vallejo. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/39344>
- Genchi, G., Sinicropi, M. S., Lauria, G., Carocci, A., & Catalano, A.** (2020). The effects of cadmium toxicity. *International Journal of Environmental Research and Public Health, 17(11), 1–24.* <https://doi.org/10.3390/ijerph17113782>

- Gramlich, A., Tandy, S., Gauggel, C., López, M., Perla, D., Gonzalez, V., & Schulin, R.** (2018). Soil cadmium uptake by cocoa in Honduras. *Science of the Total Environment*, 612, 370–378. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.145>
- Guarín, D., Martín-López, J. M., Libohova, Z., Benavides-Bolaños, J., Maximova, S. N.,
**Guarín, D., Martín-López, J. M., Libohova, Z., Benavides-Bolaños, J., Maximova, S. N.,
Guiltinan, M. J., Spargo, J. T., da Silva, M., Fernandez, A., & Drohan, P. J.** (2024). Accumulation of cadmium in soils, litter and leaves in cacao farms in the North Sierra Nevada de Santa Marta, Colombia. *Geoderma Regional*, 36, e00762. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2024.e00762>
- Guimac Cedillo, L. Y., & Verástegui Huanca, L. L.** (2022). Características y producción de cacao: Caso de la zona productora de Amazonas-Perú. *Global Business Administration Journal*, 6(1), 1–11. <https://doi.org/10.31381/gbaj.v5i2.4268>
- Gutiérrez, E., Chávez, E., Gamage, K. H. H., Argüello, D., Galkaduwa, M. B., & Hettiarachchi, G. M. (2022). *Cadmium fractionation in soils affected by organic matter application: Transfer of cadmium to cacao (Theobroma cacao L.) tissues*. *Frontiers in Environmental Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.954521>
- Haider, F. U., Liqun, C., Coulter, J. A., Cheema, S. A., Wu, J., Zhang, R., Wenjun, M., & Farooq, M.** (2021). Cadmium toxicity in plants: Impacts and remediation strategies. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 211, 111887. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111887>
- Herrera Marcano, T.** (2020). La contaminación con cadmio en suelos agrícolas. *Comité Editorial de Venesuelos*, 42–47.

- Hidalgo Tuesta, J.** (2017). *Caracterización de los sistemas de producción de cacao (Theobroma cacao L.) en el distrito Teniente César López Rojas, provincia de Alto Amazonas*. Universidad Nacional Agraria de la Selva, Facultad de Agronomía.
- Huamaní-Yupanqui, H. A., Huauya-Rojas, M. Á., Mansilla-Minaya, L. G., Florida-Rofner, N., & Neira-Trujillo, G. M.** (2012). Presence of heavy metals in organic cacao (*Theobroma cacao* L.) crop. *Acta Agronómica*, 61(4), 339–344.
- Huauya-Rojas, M. Á., Mansilla-Minaya, L. G., Florida-Rofner, N., & Neira-Trujillo, G. M.** (2012). Presencia de metales pesados en cultivos de cacao (*Theobroma cacao* L.) orgánico. *Acta Agronómica*, 61(4).
- Iffat Alam, S., Hammoda, H., Khan, F., Al Enazi, R., & Goktepe, I.** (2020). Electrical conductivity, pH, organic matter and texture of selected soils around the Qatar University campus. *Res. Agric. Livest. Fish*, 7(3), 403–409. www.agroid-bd.org/ralf
- Khan, M. A., Khan, S., Khan, A., & 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>
- Krämer, U.** (2010). Metal hyperaccumulation in plants. *Annual Review of Plant Biology*, 61, 517–534. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042809-112156>
- Kutner, M. H., Nachtsheim, C. J., Neter, J., & Li, W. (2005). *Applied linear statistical models* (5th ed.). McGraw-Hill.
- Lasluiza Quishpe, M. F. (2022). *Determinación de la concentración de metales pesados (cadmio, plomo y cromo) en la lechuga (Lactuca sativa) que se cultiva en la parroquia Presidente Urbina del cantón Píllaro* (Tesis de licenciatura). Universidad Técnica de

Ambato.

- Lavado Sunilda, T. (2020). *Efecto de la materia orgánica y roca fosfórica en la concentración de cadmio en suelo y plántones de cacao* (Tesis de licenciatura). Universidad Nacional Agraria de la Selva.
- Lewis, C., et al. (2018). Genetic variation in bioaccumulation and partitioning of cadmium in *Theobroma cacao* L. *Science of the Total Environment*, 640–641, 696–703. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.365>
- Llatance, W. O., Gonza Saavedra, C. J., Guzmán Castillo, W., & Pariente Mondragón, E. (2018). Bioacumulación de cadmio en el cacao (*Theobroma cacao*) en la Comunidad Nativa de Pakun, Perú. *Revista Forestal del Perú*, 33(1), 63. <https://doi.org/10.21704/rfp.v33i1.1156>
- Lohse Duarte, E. E. (2018). *Evaluación del rendimiento de seis genotipos de cacao (Theobroma cacao L.) instalados en cinco sistemas de producción en el ensayo experimental de Sara Ana* (Tesis de licenciatura). Universidad Mayor de San Andrés.
- López-Ulloa, M., Jaimez, R., & Orozco-Aguilar, L. (2021). *Guía: Cadmio en el cultivo de cacao. Caja de herramientas para la prevención y mitigación de la contaminación de cadmio en la cadena de cacao-Ecuador* (1st ed.).
- Lynch, M., & Walsh, B. (1998). *Genetics and analysis of quantitative traits*. Sinauer Associates.
- Matyjaszczyk, E., & Schumann, R. (2018). Risk assessment of white willow (*Salix alba*) in food. *EFSA Journal*, 16(S1), 1–9. <https://doi.org/10.2903/J.EFSA.2018.E16081>
- Maximova, S. N., Lock, T. C., & Gultinan, M. J. (2008). Cocoa. In R. A. (Ed.), *Compendium of transgenic crop plants* (pp. 1–12). Wiley-Blackwell.

- Meléndez-Mori, J. B., Guerrero-Abad, J. C., Tejada-Alvarado, J. J., Ayala-Tocto, R. Y., & Oliva, M. (2023). Genotypic variation in cadmium uptake and accumulation among fine-
 aroma cacao genotypes from northern Peru: A model hydroponic culture study.
Environmental Pollutants and Bioavailability, 35(1), 1–12.
<https://doi.org/10.1080/26395940.2023.2287710>
- Mendoza-López, K. L., Mostacero-León, J., López-Medina, S. E., Efraín Gil-Rivero, A., De La Cruz-Castillo, A. J., & Villena-Zapata, L. (2021). Cadmium in *Theobroma cacao* L.
 "cacao" plantations in the San Martín region (Lamas), Peru. *Manglar*, 18(2), 169–173.
<https://doi.org/10.17268/manglar.2021.022>
- Meter, A., Atkinson, R. J., & Laliberte, B. (2019). Cadmio en el cacao de América Latina y el Caribe: Análisis de la investigación y soluciones potenciales para la mitigación. *Biodiversity International*.
- MINAGRI. (2018). *Lineamientos de muestreo para la determinación de niveles de cadmio en suelos, hojas, granos y productos derivados de cacao* (MINAGRI, pp. 1– 18).
- MINAGRI. (2019). *Protocolos de muestreo para la determinación de cadmio en suelo, hojas, agua y granos de cacao*. Resolución Ministerial N°0007-2019-MINAGRI. (Dirección General Agrícola, Ed.). <https://www.midagri.gob.pe/portal/download/pdf/normas-legales/resolucionesministeriales/2019/enero/rm07-2019-minagri.pdf>
- MINAGRI. (2003). *Caracterización de las zonas productoras de cacao en el Perú y su competitividad* (Informe final, Programa para el Desarrollo de la Amazonía–PROAMAZONIA). Lima, Perú. 221p
- MINAM. (2017). Decreto Supremo N.º 012-2017-MINAM: *Aprueban criterios para la gestión*

de sitios contaminados. Diario Oficial El Peruano, 2 de diciembre.

MINAM. (2013). *Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Suelo*. Decreto Supremo DS N° 002-2013-MINAM. www.ana.gob.pe

Miranda, D., Carranza, C., Rojas, C. A., Martín Jerez, C., Fischer, G., & Zurita, J. (2008).

Acumulación de metales pesados en suelo y plantas de cuatro cultivos hortícolas, regados con agua del río Bogotá. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 2(2), 180–191.

<https://dialnet.unirioja.es/Servlet/articulo?codigo=10132238>

Mora Ibarra, K. A. (2019). *Mucílago de cacao (Theobroma cacao L.) de origen trinitario (CCN-51) como medio antioxidante para la obtención de almíbar de manzana (Pyrus malus L.)* (Tesis de licenciatura). Universidad Técnica Estatal de Quevedo.

Motamayor, J. C., Lachenaud, P., da Silva e Mota, J. W., Loor, R., Kuhn, D. N., Brown, J. S., & Schnell, R. J. (2008). Geographic and genetic population differentiation of the Amazonian chocolate tree (*Theobroma cacao* L.). *PLoS ONE*, 3(10), e3311.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0003311>

Motamayor, J. C., Risterucci, A. M., Lopez, P. A., Ortiz, C. F., Moreno, A., & Lanaud, C.

(2002). Cacao domestication I: The origin of the cacao cultivated by the Mayas. *Heredity*, 89(5), 380–386. <https://doi.org/10.1038/sj.hdy.6800156>

Oliva, M., Rubio, K., Epquin, M., Marlo, G., & Leiva, S. (2020). Cadmium uptake in native cacao trees in agricultural lands of Bagua, Peru. *Agronomy*, 10(10), 1551. <https://doi.org/10.3390/agronomy10101551>

Oliveira, B. R. M., de Almeida, A. A. F., Santos, N. de A., & Pirovani, C. P. (2022). Tolerance

- strategies and factors that influence the cadmium uptake by cacao tree. *Scientia Horticulturae*, 293, 110733. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110733>
- Ortiz-Álvarez, A., Magnitskiy, S., Silva-Arero, E. A., Rodríguez-Medina, C., Argout, X., & Castaño-Marín, Á. M. (2023). Cadmium accumulation in cacao plants (*Theobroma cacao* L.) under drought stress. *Agronomy*, 13(10), 2490. <https://doi.org/10.3390/agronomy13102490>
- Panduro Soto, K. V. (2018). *Estudio de las propiedades fisicoquímicas del grano seco y reológicas del licor de cacao, en tres clones, CCN51, ICS95 y ICS39, (Theobroma cacao L.)* (Tesis de licenciatura). Universidad Nacional de San Martín.
- Patiño Torres, C., & Julca Otiniano, A. (2021). *Innovación tecnológica en cacao andino. Producto 4. Informe sobre absorción de cadmio y manejo agronómico y su validación en vivero*. En *Fontagro* (Vol. 1, pp. 1–59).
- Reyes, Y. C., Vergara, I., Torres, O. E., Díaz, M., & González, E. E. (2016). Heavy metals contamination: Implications for health and food safety. *Revista Ingeniería, Investigación y Desarrollo*, 16(2), 66–77.
- Rodríguez-Velázquez, N. D., Chávez-Ramírez, B., Gómez De La Cruz, I., Vásquez-Murrieta, M.-S., & Estrada De Los Santos, P. (2022). El cultivo del cacao, sus características y su asociación con microorganismos durante la fermentación. *Alianzas y Tendencias BUAP*, 7(25), 36–51. <https://doi.org/10.5281/zenodo.6326782>.
- Rofner, N. F. (2021). Review on maximum limits of cadmium in cocoa (*Theobroma cacao* L.). *Granja*, 34(2), 113–126. <https://doi.org/10.17163/LGR.N34.2021.08>
- Rosales Huamani, J. A., Centeno Rojas, L., Cajacuri Perez, J. R., Breña Ore, J., & Chávez

- Chapana, C. (2021). Identificación de cadmio y plomo en los cultivos de cacao ubicados en la zona de Satipo - Junín. *TECNIA*, 31(2), 83–89.
<https://doi.org/10.21754/tecnia.v21i2.1062>
- Rofner, F., Lineker, S., & Melchor, R. G. B. (2018). *El pH y la absorción de cadmio en almendras de cacao orgánico (Theobroma cacao L.) en Leoncio Prado, Huánuco, Perú. Folia Amazónica*, 17(2), 45-60.
<https://revistas.iiap.gob.pe/index.php/fo liaamazonica/article/view/438/514>
- Rosales-Huamani, J. A., Breña-Ore, J. L., Sespedes-Varkarsel, S., De la Cuba, L. H., Centeno-Rojas, L., Otiniano-Zavala, A., Andrade-Choque, J., Valverde-Espinoza, S., & Castillo-Sequera, J. L. (2020). Study to determine levels of cadmium in cocoa crops applied to inland areas of Peru: The case of the Campo Verde-Honoría Tournavista corridor. *Agronomy*, 10(10), 1576. <https://doi.org/10.3390/agronomy10101576>
- Santander Ruiz, W., Garay Montes, R., Verde Girbau, C., & Mendieta Taboada, O. (2021). Determinación del contenido de cadmio en suelos, frutos, granos fermentados y secos, licor de cacao y chocolate en zonas productoras de la región San Martín. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 87(1), 39–49. <https://doi.org/10.37761/rsqp.v87i1.321>
- Scaccabarozzi, D., Castillo, L., Aromatisi, A., Milne, L., Castillo, A. B., & 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>
- Senamhi. (2021). *Boletín hidroclimático regional - Loreto: Monitoreo y pronóstico*.
<https://www.senamhi.gob.pe/load/file/01401SENA-77.pdf>
- Singh, S., Parihar, P., Singh, R., Singh, V. P., & Prasad, S. M. (2016). Heavy metal tolerance in

- plants: Role of transcriptomics, proteomics, metabolomics, and ionomics. *Frontiers in Plant Science*, 6, 1143. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.01143>.
- Tang, G., Zhang, X., Qi, L., Wang, C., Li, L., Guo, J., Dou, X., Lu, M., & Huang, J. (2021). Nitrogen and phosphorus fertilization increases the uptake of soil heavy metal pollutants by plant community. *Research Square*, 1–20. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-413625/v1>
- Torres-Gonzales, Y., Rojas-Carrizales, A. G., Salas-Contreras, W. H., & Hinojosa- Benavides, R. A. (2021). *Fitorremediación de Suelos Contaminados por Metales Pesados*. Scientific Research Journal CIDI, 1(1), 25–36. <https://doi.org/10.53942/srjicidi.v1i1.43>
- Tuesta, O. A., Tuesta, J. C., Rafael-Rutte, R., Arévalo-Gardini, E., Vela, J. M., & Arévalo-Hernández, C. O. (2024). Effect of oil palm compost and sandy soil on the growth of cacao (*Theobroma cacao* L.) seedlings. *Agronomía Mesoamericana*, 35, Article 57921. <https://doi.org/10.15517/am.2024.5792>
- Vanderschueren, R., et al. (2023). Revealing the pathways of cadmium uptake and translocation in cacao trees (*Theobroma cacao* L.): A ^{108}Cd pulse-chase experiment. *Science of the Total Environment*, 896, 161816. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161816>.
- Venturo Minauro, G. K. (2017). Determinación del contenido de cadmio en almendras frescas de tres variedades de cacao (*Theobroma cacao* L.) y del suelo y su relación con el pH y la conductividad eléctrica en las zonas de Juanjuí y Pucacaca (Tesis de licenciatura). Universidad Nacional de San Martín.
- Vela, E.** (2023). *Evaluación de la concentración de cadmio en el suelo y granos en una plantación de *Theobroma cacao* L. (cacao) en Puerto Sungaro – Huánuco 2021* (Tesis de licenciatura). Universidad Nacional Intercultural de la Amazonía.

Villalaz-Pérez, J. A., Casanoves, F., Villarreal-Núñez, J. E., Santo-Pineda, A., Gutiérrez-Lezcano, A., & Merino, A. (2024). Cadmium concentration in cocoa beans produced in agroforestry systems of small producers in Panama. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 22(1), Article 20405.

Wade, J., Ac-Pangan, M., Favoretto, V. R., Taylor, A. J., Engeseth, N., & Margenot, A. J. (2022). Drivers of cadmium accumulation in *Theobroma cacao* L. beans: A quantitative synthesis of soil-plant relationships across the Cacao Belt. *PLoS ONE*, 17(2), e0261989. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0261989>

Yadav, S. K. (2010). Heavy metals toxicity in plants: An overview on the role of glutathione and phytochelatins in heavy metal stress tolerance of plants. *South African Journal of Botany*, 76(2), 167–179. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2009.10.007>

Zhu, Y., Ma, J., Chen, F., Yu, R., & Hu, G. (2020). Remediation of soil polluted with Cd in a postmining area using thiourea-modified biochar. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17, 207654. <https://doi.org/10.3390/ijerph17207654>

ANEXO**Anexo 01. Codificación de las plantas de cacao según genotipo**

Anexo 02. *Proceso de muestreo de suelo con barreno en plantación de cacao para determinar la concentración de cadmio*



Anexo 03. Muestreo foliar de cacao para la determinación de Cd.



Anexo 04. Resultados del análisis de Cd en muestras de suelo por genotipo.

Genotipos	Repeticiones 1	Repeticiones 2	Repeticiones 3	Promedio Cd ($\mu\text{g g}^{-1}$)
CCN 51	0.5	0.6	0.4	0.50
ICS 95	0.4	0.3	0.4	0.37
Hibrido	0.4	0.5	0.3	0.40

Anexo 05. Resultados de análisis de Cd en tejido foliar de los genotipos de cacao.

Genotipos	Repeticiones 1	Repeticiones 2	Repeticiones 3	Promedio Cd ($\mu\text{g g}^{-1}$)
CCN 51	2.38	2.78	2.52	2.56
ICS 95	1.32	1.36	1.35	1.35
Hibrido	1.41	1.51	1.16	1.36

Anexo 6. Resultados de caracterización física y química de suelo en los genotipos evaluados.

Genotipos	Repeticiones	Ph	MO%	N%	P mg/k	K mg/k	Arena %	Limo %	Arcilla %	Clase textural
CCN 51	R1- R3	6.1	2.10	0.1	2.89	46.00	59.36	20.00	20.64	Fra.-Arc-Are
ICS 95	R1- R3	5.9	2.15	0.11	8.86	62.00	51.36	28.00	20.64	Franco
Hibrido	R1- R3	6.1	2.35	0.12	2.70	114.00	43.36	28.00	28.64	Fra.-Arc



INSTITUTO DE CULTIVOS TROPICALES

Investigación y Extensión agrícola para el desarrollo de la Amazonía peruana

CERTIFICADO INDECOPI N° 00072183

LABORATORIO AGRICOLA INFORME DE ENSAJO N°34-2024

Laboratorio	: LABORATORIO AGRÍCOLA
Dirección del Laboratorio	: AV. AHUASHIYACU CUADRA 16 NRO. S/N SEC. LAGUNA VENECIA-SAN MARTIN - LA BANDA DE SHILCAYO
Cliente	: ADLER LÓPEZ RENGIFO
Procedencia	: LORETO - ALTO AMAZONAS - YURIMAGUAS - FUNDO SAGRADO CORAZON
Contacto	: ADLER LÓPEZ RENGIFO
Teléfono y correo	: 935820561 rengifo3366@gmail.com
Cultivo	: CACAO
Descripción de la muestra	: SUELO
Fecha de Muestreo *	: 25/01/2024
Fecha de recepción de la muestra	: 14/02/2024
Fecha de ensayo	: 11/03/2024
Fecha de emisión de informe de ensayo	: 12/03/2024
Persona encargada de análisis	: J.A.C.V
Observación	: NINGUNA

Nota: 1- Los resultados presentados pertenecen al ítem ensayado tal como se recibió por parte del cliente.

Nota: 2- Este informe no se puede reproducir sin la aprobación del laboratorio excepto cuando se reproduce en su totalidad.



INSTITUTO DE CULTIVOS TROPICALES

Investigación y Extensión agrícola para el desarrollo de la
Amazonía peruana

CERTIFICADO INDECOPI N° 00072183

LABORATORIO AGRÍCOLA INFORME DE ENSAYO N° 34-2024

Fecha de ensayo: 11/3/2024

N ^a Item	genotipo	Repeticiones	Profundidad	Peso de muestra	Resultado Cd
					µg g ⁻¹
1	CCN 51	R1	0- 20 CM	1.83	0.50
2	CCN 51	R2	0- 20 CM	1.50	0.60
3	CCN 51	R3	0- 20 CM	1.56	0.40
1	ICS 95	R1	0- 20 CM	1.83	0.40
2	ICS 95	R2	0- 20 CM	1.77	0.30
3	ICS 95	R3	0- 20 CM	1.60	0.40
1	HIBRIDO	R1	0- 20 CM	1.65	0.40
2	HIBRIDO	R2	0- 20 CM	1.54	0.50
3	HIBRIDO	R3	0- 20 CM	1.50	0.30

* Datos proporcionados por el cliente

Nota: 1- Los resultados presentados pertenecen al ítem ensayado tal como se recibió por parte del cliente.

Nota: 2- Este informe no se puede reproducir sin la aprobación del laboratorio excepto cuando se reproduce en su totalidad.

INSTITUTO DE CULTIVOS TROPICALES
TARAPOTO - PERÚ

Cesar O. Arvalo Hernandez, MSc
JEFE DE DPTO. DE SUELOS



METODOLOGÍAS Y ESPECIFICACIONES DE ENSAYOS - SUELOS

El Laboratorio Agrícola del Instituto de Cultivos Tropicales declara que todas las muestras fueron tratadas en las mismas condiciones y utilizando los mismos equipos que son especificadas a continuación:

METODOLOGIAS	
pH	ASTM- D4972-19. Standard Test Methods for pH of Soils. 2019
CE	NORMA Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. 2002.
Carbonatos	
Materia organica	
Fosforo disponible	
CIC	
Cationes intercambiables (Ca, Mg, K, Na)	
Acidez intercambiable	
Textura	
Azufre (S)	
Boro (B) disponible	
Cu, Fe, Mn y Zn disponible	
Metales pesados (Cd, Pb, Cr, Ni)	

EQUIPOS	CODIGO	MARCA	MODELO
Balanza	EQL0335	Ohaus	PX224
Potenciometro	EQL0336	Ohaus	Starter 22100
Conductimetro	EQL 0424	Ohaus	Aquasearc her a-AB33EC
Espectrofotometro de absorción visible	EQL0118	Thermo	SPECTRONI C 20D+
Espectrofotometro de absorción atomica	EQL 00115	Varian	SPECTRAA 55 B

** Indica que método está acreditado por la NTP ISO/IEC 17025:2017

CONDICIONES AMBIENTALES				
Parametros	HR min	HR max	T° min	T° max
pH	---	---	---	---
CE	---	---	---	---
Carbonatos	---	---	---	---
Materia organica	---	---	---	---
Fosforo disponible	---	---	---	---
CIC	---	---	---	---
Cationes intercambiables (Ca, Mg, K, Na)	---	---	---	---
Al intercambiable	---	---	---	---
Azufre (S)	---	---	---	---
Boro (B) disponible	---	---	---	---
Cu, Fe, Mn y Zn disponible	---	---	---	---
Metales Pesados (Cd, Pb, Cr, Ni)	44.6	79.8	24.9	28.5
Textura	---	---	---	---

-----FIN DEL DOCUMENTO -----



INSTITUTO DE CULTIVOS TROPICALES

Investigación y Extensión agrícola para el desarrollo de la Amazonía peruana
CERTIFICADO INDECOPI N° 00072183

LABORATORIO AGRÍCOLA INFORME DE ENSAYO N° 35-2024

Laboratorio	: Laboratorio agrícola
Dircción del laboratorio	: AV. AHUASHIYACU CUADRA 16 NRO. S/N SEC. LAGUNA VENECIA- SAN MARTIN - SAN MARTIN - LA BANDA DE SHILCAYO .
Cliente	: Adler Lopez Rengifo
Procedencia	: LORETO-ALTO AMAZONAS -YURIMAGUAS-FUNDO SAGRADO CORAZON
Contacto	: Adler Lopez Rengifo
Teléfono y correo	: 935820561 rengifo3366@gmail.com
Cultivo*	: CACAO
Descripción de la muestra	: HOJA DE CACAO
Fecha de Muestreo *	: 25/01/2024
Fecha de recepción de la muestra	:14/02/2024
Fecha de ensayo	:11/03/2024
Fecha de emisión de informe de ensayo	:12/03/2024
Persona encargada de análisis	: J.A.C.V
Observación	: NINGUNO



INSTITUTO DE CULTIVOS TROPICALES

Investigación y Extensión agrícola para el desarrollo de la Amazonía
peruana CERTIFICADO INDECOPI N° 00072183

LABORATORIO AGRÍCOLA INFORME DE ENSAYO N° 35-2023

Fecha de ensayo 11/3/2024

N ^a Item	genotipo	Repeticiones	Resultados Cd
			$\mu\text{g g}^{-1}$
1	CCN 51	R1	2.38
2	CCN 51	R2	2.78
3	CCN 51	R3	2.52
1	ICS 95	R1	1.36
2	ICS 95	R2	1.32
3	ICS 95	R3	1.36
1	HIBRIDO	R1	1.41
2	HIBRIDO	R2	1.51
3	HIBRIDO	R3	1.16

Nota: 1- Los resultados presentados pertenecen al ítem ensayado tal como se recibió por parte del cliente.

Nota: 2- Este informe no se puede reproducir sin la aprobación del laboratorio excepto cuando se reproduce en su totalidad

INSTITUTO DE CULTIVOS TROPICALES
TARAPOTO - PERÚ



Cesar O. Arevalo Fernandez, MSc
JEFE DE DPTO. DE SUELOS



METODOLOGÍAS Y ESPECIFICACIONES DE ENSAYOS – TEJIDO VEGETAL

El Laboratorio Agrícola del Instituto de Cultivos Tropicales declara que todas las muestras fueron tratadas en las mismas condiciones y utilizando los mismos equipos que son especificadas a continuación:

METODOLOGIAS		EQUIPOS	CODIGO	MARCA	MODELO
N	EMBRAPA. Determinação de nitrogênio. Capítulo 2: Análise química de tecido vegetal. Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. 2 ed. 2009.	Balanza	EQL0335	Ohaus	PX224
P	EMBRAPA. Determinação de fósforo Amarelo-Vanadato. Capítulo 2: Análise química de tecido vegetal. Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. 2 ed. 2009.	Potenciometro	EQL0336	Ohaus	Starter 22100
SO4	EMBRAPA. Determinação de enxofre por Turdimetria. Capítulo 2: Análise química de tecido vegetal. Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. 2 ed. 2009.	Conductimetro	EQL 0424	Ohaus	Aquasearcher a-AB33EC
B	EMBRAPA. Determinação de boro por espectrofotometria com azometina-H. Capítulo 2: Análise química de tecido vegetal. Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. 2 ed. 2009.	Espectrofotometro de absorción visible	EQL0118	Thermo	SPECTRONIC 20D+
Ca, Mg, K, Na, Cu, Fe, Mn y Zn	EMBRAPA. Determinação por espectrofotometria de absorção atômica. Capítulo 2: Análise química de tecido vegetal. Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. 2 ed. 2009.	Espectrofotometro de absorción atomica	EQL 00115	Varian	SPECTRAA 55 B
Metales pesados (Cd, Pb, Cr, Ni)	EMBRAPA. Determinação por espectrofotometria de absorção atômica. Capítulo 2: Análise química de tecido vegetal. Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. 2 ed. 2009.				

CONDICIONES AMBIENTALES				
Parametros	HR min	HR max	T° min	T° max
N	---	---	---	---
P	---	---	---	---
SO4	---	---	---	---
B	---	---	---	---
Ca, Mg, K, Na, Cu, Fe, Mn y Zn	---	---	---	---
Metales pesados (Cd, Pb, Cr, Ni)	44.6	79.8	24.9	28.5

----- Fin del documento -----



LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL
ORGANISMO DE ACREDITACIÓN INACAL – DA
CON REGISTRO N° LE - 229



LABORATORIO AGRÍCOLA

INFORME DE ENSAYO N° 226-2024

Laboratorio	: LABORATORIO AGRÍCOLA
Dirección del Laboratorio	: AV. AHUASHIYACU CUADRA 16 NRO. S/N SEC. LAGUNA VENECIA-SAN MARTIN - SAN MARTIN - LA BANDA DE SHILCAYO
Cliente	: ADLER LÓPEZ RENGIFO
Procedencia	: LORETO–ALTO AMAZONAS–YURIMAGUAS-FUNDO SAGRADO CORAZON
Contacto	: ADLER LÓPEZ RENGIFO
Teléfono y correo	: 935820561 rengifo3366@gmail.com
Cultivo	: Cacao
Descripción de la muestra	: Suelo
Fecha de muestreo	: 25/01/2024
Fecha de resección de la muestra	: 17/07/2024
Fecha del ensayo	: 18/07/2024
Fecha de emisión de informe de ensayo	: 30/07/2024
Encargada de análisis	: J.A.C.V
Observación	: NINGUNA



**LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL
ORGANISMO DE ACREDITACIÓN INACAL – DA
CON REGISTRO N° LE - 229**



Registro N° LE - 229

LABORATORIO AGRÍCOLA INFORME DE ENSAYO N° 226-2024

Fecha de ensayo: 18/7/2024

N° Ítem	Codigo de laborato rio	Genotipo	Prof .*	Peso de muestra (kg)	RESULTADOS																	
					pH	CE	CaCO ₃	MO	N	P	K	CIC	CICef	Ca	Mg	K	Na	Saturac ión de Bases	Arena	Limo	Arcilla	Clase textural
1	194	CCN 51	0- 20 CM	1,83	6,1	0,02	<0,3	2,10	0,10	2,89	46,00	16,94	10,34	9,43	0,73	0,12	0,07	61,03	59,36	20,00	20,64	Fra-Arc- Are
2	197	ICS 95	0- 20 CM	1,83	5,9	0,03	<0,4	2,15	0,11	8,86	62,00	16,98	11,78	10,54	0,98	0,16	0,10	69,37	51,36	28,00	20,64	Franco
3	200	HIBRIDO	0- 20 CM	1,65	6,1	0,02	<0,5	2,35	0,12	2,70	114,00	23,11	18,11	16,11	1,65	0,29	0,06	78,37	43,36	28,00	28,64	Fra-Arc

* Datos proporcionados por el cliente

Nota: 1- Los resultados presentados pertenecen al ítem ensayado tal como se recibió por parte del cliente.

Nota: 2- Este informe no se puede reproducir sin la aprobación del laboratorio excepto cuando se reproduce en su totalidad

INSTITUTO DE CULTIVOS TROPICALES
TARAPOTO - PERÚ

Cesar O. Arvalo Hernandez, MSc
JEFE DE DPTO. DE SUELOS



**LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL
ORGANISMO DE ACREDITACIÓN INACAL – DA
CON REGISTRO N° LE - 229**



Registro N° LE - 229

El Laboratorio Agrícola del Instituto de Cultivos Tropicales declara que todas las muestras fueron tratadas en las mismas condiciones y utilizando los mismos equipos que son especificadas a continuación:

METODOLOGIAS		EQUIPOS	CODIGO	MARCA	MODELO
pH**	ASTM- D4972-19. Standard Test Methods for pH of Soils. 2019	Balanza	EQL0335	Ohaus	PX224
CE	NORMA Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. 2002.	Potenciómetro	EQL0336	Ohaus	Starter 22100
		Conductímetro	EQL 0424	Ohaus	Aquasearc her a-AB33EC
		Espectrofotómetro de absorción visible	EQL0118	Thermo	SPECTRONIC 20D+
Materia organica		Espectrofotómetro de absorción atómica	EQL 00115	Varian	SPECTRAA 55 B
Fosforo disponible					
CIC					
Cationes intercambiables (Ca, Mg, K, Na)					
Acidez intercambiable					
Textura					
Azufre (S)					
Boro (B) disponible					
Cu, Fe, Mn y Zn disponible					
Metales pesados (Cd**, Pb**, Cr, Ni)	EPA Method 3050B: Acid Digestion of Sediments, Sludges, and Soils. 1996.				

** Indica que método está acreditado por la NTP ISO/IEC 17025:2017

CONDICIONES AMBIENTALES				
Parametros	HR min	HR max	T° min	T° max
pH	40.1	57.2	23.9	26.2
CE	40.1	57.2	23.9	26.2
Carbonatos	40.1	57.2	23.9	26.2
Materia organica	40.1	57.2	23.9	26.2
Fosforo disponible	40.1	57.2	23.9	26.2
CIC	40.1	57.2	23.9	26.2
Cationes intercambiables (Ca, Mg, K, Na)	40.1	57.2	23.9	26.2
Al intercambiable	40.1	57.2	23.9	26.2
Azufre (S)	---	---	---	---
Boro (B) disponible	---	---	---	---
Cu, Fe, Mn y Zn disponible	---	---	---	---
Metales Pesados (Cd, Pb, Cr, Ni)	---	---	---	---
Textura	40.1	57.2	23.9	26.2

Adler López Rengifo

INFORME DE TESIS - Adler López Rengifo PDF.pdf

 Universidad Nacional Autónoma de Alto Amazonas

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn.cid: 5388-56845767

Fecha de entrega

25 feb 2026, 8:50 a.m. GMT-5

Fecha de descarga

25 feb 2026, 8:53 a.m. GMT-5

Nombre del archivo

INFORME DE TESIS - Adler López Rengifo PDF.pdf

Tamaño del archivo

574.0 KB

59 páginas

13.021 palabras

68.791 caracteres




6% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- ▶ Bibliografía
- ▶ Texto citado
- ▶ Texto mencionado
- ▶ Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

Fuentes principales

- 5%  Fuentes de Internet
- 1%  Publicaciones
- 3%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitan distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que puedas revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.