

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA

FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS

ESCUELA PROFESIONAL DE AGRONOMÍA



T E S I S

**EVALUACIÓN DE LA BIOACUMULACIÓN DE CADMIO EN GENOTIPOS DE
CACAO (*Theobroma cacao* L.) PROPAGADOS POR SEMILLA BOTÁNICA EN
CONDICIONES DE VIVERO EN LA REGIÓN SAN MARTÍN**

Para optar el Título Profesional de:

INGENIERO AGRÓNOMO

Presentado por la Bachiller:

MAYBELLINE LUZMERY AVALOS DÍAZ

Asesores:

Dr. WILFREDO POMA ROJAS

Ing. M. Sc. JORGE LUIS PAZ URRELO

CAJAMARCA – PERÚ

2026

CONSTANCIA DE INFORME DE ORIGINALIDAD

1. Investigador: **Maybelline Luzmery Avalos Díaz**
DNI: N° 76575055
Escuela Profesional/Unidad UNC: **Agronomía**
2. Asesor:
Dr. Wilfredo Poma Rojas
3. Facultad/Unidad UNC: **Ciencias Agrarias**
4. Grado académico o título profesional
☐ Bachiller ☒ Título profesional ☐ Segunda especialidad
☐ Maestro ☐ Doctor
5. Tipo de Investigación:
☒ Tesis ☐ Trabajo de investigación ☐ Trabajo de suficiencia profesional
☐ Trabajo académico
6. Título de Trabajo de Investigación:
EVALUACIÓN DE LA BIOACUMULACIÓN DE CADMIO EN GENOTIPOS DE CACAO (*Theobroma cacao* L.) PROPAGADOS POR SEMILLA BOTÁNICA EN CONDICIONES DE VIVERO EN LA REGIÓN SAN MARTÍN
7. Fecha de evaluación: **16/02/2026**
8. Software antiplagio: ☒ TURNITIN ☐ URKUND (OURIGINAL) (*)
9. Porcentaje de Informe de Similitud: **10%**
10. Código Documento: oid: 3117: 557677183
11. Resultado de la Evaluación de Similitud: **10%**
☒ APROBADO ☐ PARA LEVANTAMIENTO DE OBSERVACIONES O DESAPROBADO

Fecha Emisión: **18/02/2026**

Firma y/o Sello Emisor Constancia
 ----- Dr. Wilfredo Poma Rojas DNI: 26719942

* En caso se realizó la evaluación hasta febrero de 2026



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA

"NORTE DE LA UNIVERSIDAD PERUANA"

Fundada por Ley N° 14015, del 13 de febrero de 1962

FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS

Secretaría Académica



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

En la ciudad de Cajamarca, a los treinta días del mes de enero del año dos mil veintiséis, se reunieron en el ambiente 2C - 202 de la Facultad de Ciencias Agrarias, los miembros del Jurado, designados según **Resolución de Consejo de Facultad N° 036-2026-FCA-UNC, de fecha 12 de enero del 2026**, con la finalidad de evaluar la sustentación de la **TESIS** titulada: **"EVALUACIÓN DE LA BIOACUMULACIÓN DE CADMIO EN GENOTIPOS DE CACAO (*Theobroma cacao* L.) PROPAGADOS POR SEMILLA BOTÁNICA EN CONDICIONES DE VIVERO EN LA REGIÓN SAN MARTÍN"**, realizada por la Bachiller **MAYBELLINE LUZMERY AVALOS DÍAZ** para optar el Título Profesional de **INGENIERO AGRÓNOMO**.

A las once horas y cero minutos, de acuerdo a lo establecido en el **Reglamento Interno para la Obtención de Título Profesional de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Cajamarca**, el Presidente del Jurado dio por iniciado el Acto de Sustentación, luego de concluida la exposición, los miembros del Jurado procedieron a la formulación de preguntas y posterior deliberación. Acto seguido, el Presidente del Jurado anunció la aprobación por unanimidad, con el calificativo de dieciséis (16); por tanto, la Bachiller queda expedita para proceder con los trámites que conlleven a la obtención del Título Profesional de **INGENIERO AGRÓNOMO**.

A las doce horas y cero minutos del mismo día, el Presidente del Jurado dio por concluido el Acto de Sustentación.


Dr. Isidro Rimarachín Cabrera
PRESIDENTE


MBA. Ing. Santiago Demetrio Medina Miranda
SECRETARIO


Ing. José Lizandro Silva Mego
VOCAL


Dr. Wilfredo Poma Rojas
ASESOR


Ing. Mg. Sc. Jorge Luis Paz Urrelo
ASESOR

DEDICATORIA

A mi familia, cuyo respaldo incondicional, paciencia y apoyo constante han sido el pilar fundamental en este camino. Su confianza en mí me motivó a superar cada desafío y a alcanzar esta meta. A mis asesores, por su guía excepcional, por compartir su experiencia y conocimientos, y por su dedicación para orientarme durante todo este proceso. También extendiendo mi gratitud a aquellos amigos y colegas que con su compañía y palabras de aliento hicieron este recorrido más llevadero.

AGRADECIMIENTO

Expreso mi más profundo agradecimiento al Dr. Wilfredo Poma Rojas, por brindarme apoyo y confianza invaluable, fundamental para la realización de la presente investigación de tesis. Su guía y orientaciones me brindaron la fortaleza y seguridad necesaria para enfrentar cada desafío.

De igual manera, agradezco sinceramente al Ing. M. Sc. Jorge Luis Paz Urrelo por el soporte incondicional y guía a lo largo de este proceso, su apoyo y orientación no solo enriquecieron este trabajo, sino que también ampliaron mi visión y conocimiento en el tema.

Mi gratitud se extiende al Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA) y al Programa Nacional de Café y Cacao de la Estación Experimental Agraria el Porvenir, por ofrecerme la oportunidad de llevar a cabo esta investigación en su prestigiosa institución. Su apoyo fue esencial para el desarrollo y culminación de este proyecto.

Finalmente, agradezco a los colaboradores que participaron en las actividades de campo, cuya cooperación y compromiso hicieron posible la ejecución de este estudio. A todos ellos, mi más sincero reconocimiento y aprecio.

ÍNDICE

Contenido	Página
CAPÍTULO I.....	1
INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Descripción del problema.....	2
1.2. Formulación del problema	3
1.3. Justificación.....	3
1.4.OBJETIVOS	3
1.4.1. Objetivo general	3
1.4.2. Objetivos específicos	3
1.5.HIPÓTESIS.....	4
1.5.1. Hipótesis nula	4
1.5.2. Hipótesis alterna	4
CAPÍTULO II	5
REVISIÓN DE LITERATURA	5
2.1. Antecedentes.....	5
2.2. Bases teóricas	7
2.2.1. Descripción morfológica del cacao (Theobroma cacao L.)	7
2.2.2. Clasificación taxonómica.....	7
2.2.3. Propagación botánica.....	7
2.2.4. Fisiología del cacao	8
2.2.5. Genotipos de cacao (Theobroma cacao L.).....	8
2.2.6. Metales Pesados.....	11

2.2.7. Factores que influyen en la absorción de cadmio.....	12
2.2.8. Ingreso, movilización y mecanismos de regulación o tolerancia de T. cacao frente a la presencia de Cd.....	14
2.2.9. Efectos morfológicos y fisiológicos del cadmio	15
2.3. Definición de Términos.....	16
CAPÍTULO III	18
MATERIALES Y MÉTODOS	18
3.1. Ubicación	18
3.2. Materiales y Equipos.....	19
3.2.1. Material vegetal	19
3.2.2. 6.2.2. Material de campo.....	19
3.2.3. 6.2.3. Materiales y equipos de laboratorio	19
3.3. Metodología.....	20
3.3.1. Variables.....	20
3.3.2. Diseño experimental	21
3.3.3. Procedimiento.....	22
3.3.4. Análisis de Datos	27
CAPÍTULO IV	28
RESULTADOS Y DISCUSIONES	28
4.1. Efectos morfológicos	28
4.1.1. Variable Diámetro de tallo	28
4.1.2. Variable Altura de planta	31
4.1.3. Variable Número de hoja	35

4.2. Efectos fisiológicos.....	38
4.2.1. Variable Clorofila	38
4.2.2. Concentración de Cadmio	41
CAPÍTULO V	46
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	46
CAPÍTULO VI.....	47
BIBLIOGRAFÍA.....	47
CAPÍTULO VII.....	59
ANEXOS	59
Anexo 1: Panel Fotográfico	59
Anexo 2: Documentos de referencia para el análisis espectrofotométrico	69

ÍNDICE DE TABLAS

Contenido	Página
Tabla 1 <i>Variables dependientes e independientes.</i>	20
Tabla 2 <i>Características del experimento.</i>	21
Tabla 3 <i>Tratamientos y randomización</i>	21
Tabla 4 <i>Resumen del Análisis de varianza para la variable Diámetro de tallo (cm) a los 60, 75, 90, y 105 DDT</i>	28
Tabla 5 <i>Diámetro de tallo (cm) en los diferentes tratamientos (Clon x Dosis) de las plantas de cacao en diferentes días de evaluaciones</i>	29
Tabla 6 <i>Análisis de varianza para la variable Altura de planta (cm) a los 60, 75, 90, y 105 DDT.</i>	32
Tabla 7 <i>Altura de planta en los diferentes tratamientos (Clon x Dosis) de los genotipos de cacao en diferentes días de evaluaciones</i>	33
Tabla 8 <i>Resumen del Análisis de varianza para la variable Número de hoja, en diferentes periodos de evaluaciones (60, 75, 90, y 105 DDT)</i>	35
Tabla 9 <i>Número de hojas en los diferentes tratamientos (Clon x Dosis) de los genotipos de cacao en cuatro periodos de evaluación</i>	36
Tabla 10 <i>Resumen del Análisis de varianza para la variable Clorofila a los 90, y 105 DDT.</i>	38
Tabla 11 <i>Clorofila (índice SPAD) en los diferentes tratamientos (Clon x Dosis) de las plantas de cacao en dos periodos de evaluación</i>	39
Tabla 12 <i>Resumen del Análisis de varianza para la variable Concentración de Cadmio (ppm) a los 60, 75, 90, y 105 DDT.</i>	41
Tabla 13 <i>Respuesta de la concentración de Cd en diferentes órganos vegetales de los genotipos de cacao, frente a la aplicación de tres concentraciones de Cd</i>	42

ÍNDICE DE FIGURAS

Contenido	Página
Figura 1 <i>Mapa de ubicación de la investigación</i>	18
Figura 2 <i>Distribución de las unidades experimentales</i>	22
Figura 3 <i>Efectos morfológicos en genotipos de cacao por efecto de tres dosis de Cd</i> 30	
Figura 4 <i>Altura de planta en genotipos de cacao CCN 51, IMC 67, ICS 39, TSH 565 por efecto de tres dosis de Cd, evaluado a los 60, 75, 90 y 105 DDT</i>	34
Figura 5 <i>Número de hojas en genotipos de cacao CCN 51, IMC 67, ICS 39, TSH 565 por efecto de tres dosis de Cd, evaluado a los 60, 75, 90 y 105 DDT</i>	37
Figura 6 <i>Contenido de Clorofila en genotipos de cacao por efecto de tres dosis de Cd, a los 90 y 105 DDT</i>	40
Figura 7 <i>Concentración de Cd en raíces de los genotipos de T. cacao contaminados con tres dosis de Cd</i>	43
Figura 8 <i>Concentración de Cd en tallos de los genotipos de T. cacao contaminados con tres dosis de Cd</i>	43
Figura 9 <i>Concentración de Cd en hojas de los genotipos de T. cacao contaminados con tres dosis de Cd</i>	44
Figura 10 <i>Recolección de ceniza para desinfección de semillas</i>	59
Figura 11 <i>Solarización del sustrato</i>	60
Figura 12 <i>Selección y colecta de mazorcas de T. cacao</i>	60
Figura 13 <i>Extracción de semillas</i>	61
Figura 14 <i>Recolección de ceniza para desinfección de semillas</i>	61
Figura 15 <i>Desmucilago de semillas con aserrín</i>	62
Figura 16 <i>Pregerminado de semillas</i>	62
Figura 17 <i>Preparación de la solución de cloruro de cadmio (CdCl₂H₂O)</i>	63
Figura 18 <i>Llenado de bolsas almacigueras</i>	63

Figura 19 <i>Siembra de semillas en bolsas almacigueras.</i>	64
Figura 20 <i>Crecimiento de las plantas en sustrato contaminado (5 DDT)</i>	64
Figura 21 <i>Observación de las hojas verdaderas (15 DDT)</i>	65
Figura 22 <i>Evaluación del diámetro de tallo</i>	65
Figura 23 <i>Medición del contenido de clorofila</i>	66
Figura 24 <i>Riego de las unidades experimentales</i>	66
Figura 25 <i>Plántulas con 60 días DDT.</i>	67
Figura 26 <i>Extracción de tallos, hojas y raíces para análisis de laboratorio</i>	67
Figura 27 <i>Digestión nítrico-perclórica de tallos, hojas y raíces.</i>	68
Figura 28 <i>Determinación de contenido de cadmio en tallos, hojas y raíces mediante espectrofotometría de emisión atómica</i>	68
Figura 29 <i>Method 3050B acid digestion of sediments, sludges, and soils</i>	69
Figura 30 <i>Method 6010D inductively coupled plasma—optical emission spectrometry</i>	70

RESUMEN

El cacao (*Theobroma cacao* L.), es uno de los cultivos más importantes para la economía de la región San Martín y otras regiones productoras del Perú; sin embargo, su alta capacidad de bioacumular cadmio (Cd) en sus tejidos vegetales, y translocarlo hacia sus órganos aéreos, representa un riesgo ambiental, agrícola y sanitario por tratarse de un metal pesado de alta toxicidad. La investigación consistió en evaluar la bioacumulación de cadmio (Cd) y sus efectos en cuatro genotipos de cacao (CCN-51, IMC-67, ICS-39, TSH-565); mediante tres dosis de exposición (0, 6 y 12 ppm). Se analizaron variables morfológicas: diámetro de tallo, número de hojas y altura de planta; y fisiológicas: concentración de Cd y contenido de clorofila, considerando cuatro periodos de evaluación (60, 75, 90 y 105 días después del trasplante). La concentración de Cd en tallos, hojas y raíces se determinó mediante espectrofotometría de emisión atómica en el laboratorio de suelos, aguas y foliares del Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA). Los resultados mostraron que, CCN-51 acumuló más Cd en tallos y hojas (23.42 y 25.29 mg/kg respectivamente), manteniendo un desarrollo vegetativo estable, TSH-565 concentró mayores niveles en raíces (22.59 mg/kg); ICS 39, pese a registrar alta acumulación en todos los órganos, mantuvo una respuesta morfológica relativamente estable. En contraste, IMC-67 registró las concentraciones más bajas (11.44, 11.45 y 12.63 mg/kg). La selección de clones de menor acumulación, como IMC 67, junto con la implementación de estrategias de mejoramiento genético o cruzamientos con genotipos tolerantes como CCN 51, y prácticas agrícolas que reduzcan la biodisponibilidad del metal en el suelo, son medidas clave para asegurar una producción sostenible y competitiva en mercados internacionales.

Palabras clave: *Theobroma cacao*, cadmio, bioacumulación, genotipos.

ABSTRACT

Cocoa (*Theobroma cacao* L.) is one of the most important crops for the economy of the San Martín region and other producing areas of Peru; however, its high capacity to bioaccumulate cadmium (Cd) in vegetative tissues and translocate it to aerial organs represents an environmental, agricultural, and health risk, as Cd is a highly toxic heavy metal. This research evaluated Cd bioaccumulation and its effects in four cacao genotypes (CCN-51, IMC-67, ICS-39, TSH-565) under three exposure doses (0, 6, and 12 ppm). Morphological variables (stem diameter, number of leaves, plant height) and physiological variables (Cd concentration and chlorophyll content) were analyzed across four evaluation periods (60, 75, 90, and 105 days after transplanting). Cd concentrations in stems, leaves, and roots were determined by atomic emission spectrophotometry at the Soil, Water, and Foliar Laboratory of the National Institute of Agricultural Innovation (INIA). Results showed that CCN-51 accumulated higher Cd levels in stems and leaves (23.42 and 25.29 mg/kg, respectively), maintaining stable vegetative growth; TSH-565 concentrated higher levels in roots (22.59 mg/kg); ICS-39, although recording high accumulation in all organs, maintained relatively stable morphological responses; while IMC-67 registered the lowest concentrations (11.44, 11.45, and 12.63 mg/kg). The selection of low-accumulating clones such as IMC-67, together with genetic improvement strategies or crosses with tolerant genotypes such as CCN-51, and agricultural practices that reduce Cd bioavailability in soils, are key measures to ensure sustainable production and competitiveness in international markets.

Keywords: *Theobroma cacao*, cadmium, bioaccumulation, genotypes.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

El Perú es considerado el octavo mayor productor mundial de granos de cacao; y el segundo mayor exportador de grano orgánico, después de la República Dominicana, siendo Europa el principal mercado. Este posicionamiento internacional evidencia la relevancia económica y social del cacao para el país, y subraya la necesidad de garantizar la calidad e inocuidad del producto frente a las exigencias de los mercados externos. En el periodo enero-diciembre del 2022, las regiones: San Martín (65 814 tn), Junín (31 9860 tn), Ucayali (22 724 tn), Huánuco y Cusco (16 602 y 8042 tn respectivamente); concentraron el 80% de la producción nacional (MIDAGRI 2023).

Sin embargo, la producción nacional podría verse afectada por los altos niveles de cadmio presente en suelos donde se cultiva cacao. Un estudio realizado por la Universidad Científica del Sur, reveló que el 89 % de muestras analizadas de *T. cacao* de granos y suelos en la región Piura superaron los 0.8 mg/kg de cadmio (Infobae Perú, 2023); limitando su acceso a mercados internacionales, como la Unión Europea, que desde 2019 regula mediante el reglamento (UE) N°488/2014 un límite máximo de 0.8 ppm de este metal en productos de cacao y chocolate (Comisión Europea, 2014).

En Perú, zonas con altas concentraciones de cadmio en granos de cacao han sido identificadas; sin embargo, no se dispone de un mapeo integral y confiable a nivel nacional, (Thomas et al, 2023). Plantaciones en las regiones de Tumbes, Piura y Amazonas, muestran niveles de bioabsorción en hojas y semillas de diferentes progenies, superiores a los permisibles (Arevalo - Gardini et al, 2017); siendo Piura la más afectada, con una reducción del 31% de sus exportaciones a Europa (Villar et al., 2022). La evidencia de efectos nocivos en plantaciones de cacao expuestas a este metal, como deformación de cloroplastos, y reducción del grosor del mesófilo en las hojas, refleja alteraciones morfológicas; asimismo, en cuanto a

su impacto fisiológico, la alteración de la cromatina nuclear en las células que desencadena estrés genotóxico, junto con los cambios en la actividad enzimática (Castro et al., 2015), ponen de manifiesto la necesidad de una mayor atención sobre estos efectos.

Esta bioacumulación no solo interfiere con el funcionamiento normal de la planta, también supone un riesgo para la salud humana y animal al integrarse en la cadena alimenticia, por lo cual resulta necesario incluir estrategias de control y/o mitigación, resguardando la biodiversidad y calidad de los alimentos que ingerimos (Ramtahal, G. et al., 2016).

En este contexto, la presente investigación tuvo como objetivo evaluar la bioacumulación de Cd y su impacto en genotipos de cacao. Los resultados generan conocimientos sobre los efectos de este metal en plantas de cacao propagadas por semilla botánica, y aportan evidencia científica de utilidad para productores, instituciones y programas de certificación. Así mismo, los hallazgos permiten orientar estrategias de mitigación y selección de genotipos tolerantes, contribuyendo al desarrollo de una producción de cacao más sostenible, segura para el consumo humano y competitiva en los mercados internacionales.

1.1. Descripción del problema

La presencia de niveles de cadmio (Cd) superiores a los límites permisibles en granos de cacao en algunas zonas productoras del país limita la competitividad del cacao peruano en mercados internacionales como Europa. A pesar de su relevancia, la información sobre la bioacumulación de Cd y sus efectos morfológicos y fisiológicos en distintos genotipos de cacao continúa siendo limitada, revelando una brecha en el conocimiento científico que hacía necesaria la realización de esta investigación.

1.2. Formulación del problema

¿Cuáles son los efectos morfológicos y fisiológicos que puede generar la bioacumulación de cadmio en genotipos de cacao propagados por semilla botánica?

1.3. Justificación

Perú es uno de los países más sobresalientes en la producción de cacao; sin embargo, enfrenta un gran desafío debido a los niveles de Cd presente en los suelos donde se cultiva esta especie, limitando la producción para el acceso a mercados internacionales. Dado que existen regiones que presentan naturalmente concentraciones de Cd en niveles superiores a los permisibles, es crucial comprender los efectos nocivos principales de este metal en las plantas de cacao, para sentar las bases e implementar estrategias que aseguren la calidad del cacao y mantengan su competitividad global. La presente investigación aborda esta problemática, desarrollando un estudio confiable de las concentraciones de cadmio en suelo, y como su bioacumulación repercute en el desarrollo vegetativo del cacao en la región San Martín.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo general

Determinar la bioacumulación de Cd y sus efectos en genotipos de cacao, obtenidos por semilla botánica en condiciones de vivero en la región San Martín.

1.4.2. Objetivos específicos

Cuantificar y comparar la concentración de cadmio en raíces, tallos y hojas de cuatro genotipos de cacao, obtenidos por semilla botánica.

Evaluar los efectos del cadmio en variables morfológicas y fisiológicas en cuatro genotipos de cacao, obtenidos por semilla botánica.

1.5. HIPÓTESIS

1.5.1. Hipótesis nula

El cadmio no genera efectos morfológicos y fisiológicos negativos en los cuatro genotipos de cacao propagados mediante semilla botánica.

1.5.2. Hipótesis alterna

El cadmio genera efectos morfológicos y fisiológicos negativos en los cuatro genotipos de cacao propagados mediante semilla botánica.

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Antecedentes

Pérez-Moncada, U. A., et al. (2019), en Colombia, evaluó la bioacumulación de cadmio (Cd) en el genotipo de cacao IMC-67 en suelos contaminados con Cd, las plantas fueron sometidas a cinco niveles de exposición (0, 6, 12, 18 y 24 mg/kg), con y sin inoculación de hongos formadores de micorrizas arbusculares (HFMA). Los resultados mostraron que IMC-67 transloca Cd hacia tallos, hojas y raíces, pero la inoculación con HFMA nativos redujo significativamente la acumulación en todos los órganos evaluados.

En Brasil, Araújo et al. (2017) demostraron que la exposición de plantas jóvenes de cacao a Cd, afecta la fotosíntesis y la producción de pigmentos, induce estrés oxidativo que activa defensas enzimáticas y no enzimáticas; a nivel molecular y ultraestructural, observaron alteraciones celulares y daños en los cloroplastos, evidenciando el impacto negativo del Cd sobre la estabilidad de los tejidos.

Arévalo, E., et al., (2016), en Perú, evaluaron la presencia de metales pesados en suelos de plantaciones de *T. cacao* en tres regiones del Perú, los resultados revelaron que en la zona Norte, Piura presentó los mayores valores de cadmio en suelo ($0.53 \pm 0.02 \mu\text{g}$); destacando la importancia de seleccionar genotipos adecuados para la producción de cacao en áreas con suelos contaminados, con el fin de minimizar la transferencia del metal a los productos agrícolas y proteger la salud de los consumidores.

Asimismo, Castro et al. (2015) reportaron cambios morfológicos, bioquímicos y moleculares inducidos por la toxicidad de Cd en plántulas de cacao, confirmando alteraciones estructurales y funcionales en etapas tempranas de desarrollo. Los resultados evidenciaron reducciones significativas en la longitud de raíces y tallos, disminución en el contenido de clorofila y biomasa, así como un aumento en la actividad de enzimas antioxidantes y

sobreexpresión de genes de defensa, lo que demuestra el impacto temprano del cadmio sobre la fisiología del cacao.

Crozier, J. (2012), reportó valores de $0.79 \mu\text{g g}^{-1}$ para la zona Norte, $0.68 \mu\text{g g}^{-1}$ y $0.46 \mu\text{g g}^{-1}$, para el Centro y Sur del Perú respectivamente; considerado como superior al valor crítico ($0.43 \mu\text{g g}^{-1}$) de Cd total para suelos agrícolas, establecido por La Agencia del Medio Ambiente de los Estados Unidos de Norteamérica (USEPA, 2002).

Meléndez Mori (2021), evaluó la dinámica de absorción y translocación del Cd, transporte y acumulación en condiciones de vivero, en cinco genotipos de cacao nativo (JMB1, JSM2, INDES39, JSM3 e INDES38) de la región Amazonas; determinando que la afinidad del cadmio por las raíces de cacao es alta, pero su translocación a las hojas varía según el genotipo, siendo INDES38 la mejor alternativa por presentar menor acumulación y translocación de Cd.

Oc Llatance et al. (2018) evaluaron la bioacumulación de Cd en plantas de cacao cultivadas en la Comunidad Nativa de Pakun – Perú, evidenciando que este metal pesado se transloca desde el suelo hacia los tejidos de la planta, incluyendo las semillas. Los resultados evidenciaron la presencia de Cd en raíces, hojas y semillas, confirmando que el contaminante logra movilizarse hacia los tejidos aéreos, evidenciando riesgo de translocación en órganos de consumo.

En la región de San Martín - Perú, se han identificado genotipos de cacao que muestran una capacidad variable para acumular cadmio en sus tejidos; un estudio llevado a cabo en el Instituto de Cultivos Tropicales (ICT), de la ciudad de Tarapoto, Perú, donde se pretendió evaluar la capacidad de absorción de Cd en seis genotipos de cacao (*Theobroma cacao* L.), evidenciaron que, la progenie IMC67 presentó menor absorción en la parte aérea y raíz, siendo la mejor alternativa para los agricultores (Chupillon, J., et al., 2017).

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Descripción morfológica del cacao (*Theobroma cacao* L.)

Ramírez, M., et al. (2018) refiere que:

El cacao (*Theobroma cacao* L.) es un árbol perennifolio que puede alcanzar entre 4 y 8 metros de altura en condiciones de cultivo, aunque puede crecer hasta 15 metros en su estado natural.

Las hojas del cacao son simples, alternas, grandes y de forma oblonga o elíptica, con un margen entero y una textura coriácea¹; los árboles jóvenes tienen hojas de color rojizo que se vuelven verdes a medida que maduran.

Las flores del cacao son pequeñas, de color blanco a rosado, y crecen directamente del tronco y ramas principales, en un fenómeno conocido como cauliflora¹.

Los frutos del cacao, conocidos como mazorcas, son de forma oblonga a ovoide, y presentan una cáscara gruesa y rugosa.

Cada mazorca contiene entre 20 y 50 semillas, comúnmente denominadas granos de cacao, que están rodeadas por una pulpa dulce y mucilaginosa

2.2.2. Clasificación taxonómica

El cacao (*Theobroma cacao* L.) pertenece al reino Plantae, en el orden Malvales, y es miembro de la familia Malvaceae; el género es *Theobroma*, y la especie específica es *Theobroma cacao* L., este árbol es fundamental en la producción de granos de cacao, los cuales son procesados para obtener chocolate. (Motomayor, J., et al., 2008).

2.2.3. Propagación botánica

La propagación por semillas del cacao es un método tradicional y ampliamente utilizado para la reproducción de este árbol, según Agudelo, G., et al. (2021), este proceso comienza con la recolección de las mazorcas maduras del cacao, que contienen las semillas conocidas como granos de cacao; las mazorcas se parten y se retiran las semillas, que están

rodeadas por una pulpa dulce y mucilaginosa, estas semillas se limpian cuidadosamente para eliminar la pulpa y se dejan secar antes de ser plantadas.

Las semillas se plantan en pequeñas bolsas de vivero o directamente en el suelo, en un lugar sombreado y con buena retención de humedad, es importante mantener el suelo húmedo, pero no encharcado durante el proceso de germinación, el cual puede tomar entre 5 y 7 días. Una vez que las plántulas han germinado y desarrollado sus primeras raíces y hojas, se pueden trasplantar a macetas más grandes o directamente al campo (Agudelo, G., et al., 2021).

2.2.4. Fisiología del cacao

El cultivo del cacao se sustenta en una compleja interacción entre sus procesos fisiológicos y las condiciones ambientales; estudios han evidenciado que la disponibilidad de agua impacta directamente en el potencial hídrico foliar, lo que determina la eficiencia de la fotosíntesis y, en consecuencia, el crecimiento y desarrollo de la planta (García Lozano & Moreno Fonseca, 2016). Además, el manejo agronómico - especialmente prácticas como la poda y el control del dosel arbóreo - facilita la redistribución de nutrientes y la regulación térmica, promoviendo un equilibrio entre el crecimiento vegetativo y la producción de frutos (Gutiérrez, Gómez, & Rodríguez, 2011).

Por otro lado, bajo condiciones de estrés ambiental, ostenta la capacidad de activar mecanismos adaptativos, como el cierre estomático y ajustes en la transpiración, para salvaguardar su funcionamiento fisiológico y mantener la productividad, lo cual es clave para la sostenibilidad del cultivo frente a las fluctuaciones climáticas (Valenzuela et al., 2021).

2.2.5. Genotipos de cacao (*Theobroma cacao* L.)

a. CCN 51

El CCN 51 (Colección Castro Naranjal 51) esta variedad de cacao (*Theobroma cacao* L.) desarrollada en Ecuador por Homero Castro Zurita, se caracteriza por su alta productividad, resistencia a enfermedades y rápido crecimiento, lo que lo ha convertido en una de las

variedades más cultivadas en América Latina, con un rendimiento elevado, logrando alcanzar entre 2,000 y 3,000 kg/ha, superando a los cacaos finos de aroma (Andrade-Almeida et al., 2019); también menciona, en cuanto a su composición química, el contenido de proteína cruda es 78.8 % superior al promedio de otras variedades, mientras que su contenido de grasa es 10.1 % menor, lo que influye en su perfil sensorial. Asimismo, Requejo Estela et al. (2024) refiere que, presenta tolerancia a *Moniliophthora roreri* y *Phytophthora palmivora*, dos de las principales amenazas del cacao. Según Rosas-Patiño et al. (2019), el clon CCN-51 presenta mayor capacidad en el uso de nutrientes en comparación con ICS-1, ICS-39 y TSH565, evidenciando un alto rendimiento frente una menor disponibilidad de nutrientes.

Lagos Quispe et al. (2024), evaluó la fermentación del CCN 51 con *Saccharomyces cerevisiae* y *Lactobacillus fermentum*, encontrando que la levadura mejoró las características organolépticas, mientras que la bacteria generó sabores más amargos y astringentes; lo cual confirma que el CCN 51, aunque productivo, tiene una calidad sensorial inferior a los cacaos finos.

Ha sido adoptado ampliamente en Ecuador, Perú y Colombia, representando una alternativa para productores que buscan mayor rentabilidad. Sin embargo, su perfil de sabor menos complejo ha generado debates sobre su impacto en la calidad del chocolate (Andrade-Almeida et al., 2019).

b. IMC 67

El genotipo IMC 67 proviene de la serie Iquitos Mixed Calabacillo, originaria de la región amazónica, conocida por su alta tasa de germinación, rápido crecimiento y adaptabilidad a diferentes condiciones agroecológicas; utilizada ampliamente como portainjerto debido a su vigor y resistencia; presenta un crecimiento acelerado (0.200 cm/día), incremento en diámetro del tallo de 0.003 cm/día, con una tasa de germinación del 95 %, alta compatibilidad con diferentes genotipos injertados, y una tasa de prendimiento del injerto superior al 95 %, ideal

para programas de propagación (Gamboa-Tabares et al., 2021). Sin embargo, Cadavid-Vélez (2006) evidenció incompatibilidad con los clones ICS-39, ICS-60, ICS-95 y SC-6 cuando actúa como madre.

c. ICS 39

El genotipo ICS 39 (Imperial College Selections 39) es una variedad de cacao (*Theobroma cacao* L.) reconocida por su alto contenido de polifenoles, lo que le confiere propiedades antioxidantes y beneficios para la salud, se ha demostrado que la fermentación y el secado reducen su concentración, pero mejoran la calidad sensorial del grano (Orozco Ortiz, 2025).

En cuanto a su adaptabilidad, se cultiva en diversas regiones tropicales, mostrando buena resistencia a condiciones ambientales adversas; asimismo, en términos de rendimiento y calidad, aunque su producción es menor que la de clones comerciales como CCN 51, su perfil sensorial es más apreciado en la industria del chocolate fino de alta calidad (Rosas-Patiño et al., 2019).

d. TSH 565

Pineda et al. (2012) refiere que, el genotipo TSH 565 (Trinidad Selected Hybrid 565) es un clon de cacao (*Theobroma cacao* L.) desarrollado en Trinidad y Tobago, reconocido por su alto rendimiento (se ha registrado una producción superior a 1,500 kg/ha), tolerancia a *Moniliophthora roreri* y *Phytophthora palmivora*, y un perfil sensorial equilibrado en cuanto a contenido de polifenoles y grasas; lo cual lo hace atractivo para cultivos comerciales, cuenta con gran acogida en la producción de cacao de diversas regiones tropicales, principalmente en Colombia, Perú y Ecuador, donde se ha identificado como una alternativa viable para mejorar la productividad y calidad del cacao; asimismo, su adaptabilidad a diferentes condiciones agroecológicas lo hace ideal para sistemas agroforestales.

2.2.6. Metales Pesados

Los metales pesados son elementos químicos con una alta densidad, generalmente cinco veces mayor que la del agua, estos metales, como el mercurio, plomo, cadmio y arsénico, son tóxicos para los seres vivos y pueden acumularse en el medio ambiente y en los organismos; estos metales pueden provenir de diversas fuentes, de origen natural o incluyendo actividades industriales, minería, y el uso de pesticidas y fertilizantes en la agricultura (Ministerio de Salud, 2023).

La presencia de metales pesados en los suelos constituye un desafío ambiental crítico, ya que estos contaminantes alteran las propiedades físico-químicas del suelo y afectan la microbiota esencial para la fertilidad, reduciendo el rendimiento de los cultivos (Loyde de la Cruz et al., 2022).

Cadmio (Cd)

El cadmio es un metal pesado altamente tóxico, sin funciones biológicas esenciales (Huaraca-Fernández et al., 2020). Se encuentra de manera natural en la corteza terrestre, pero no en su forma elemental; comúnmente como Cd_2 , estado de oxidación el cual le permite formar iones complejos fácilmente, como óxidos, sulfuros y carbonatos, estos compuestos se liberan al ambiente a partir de procesos geológicos como la meteorización y la erosión, pudiendo establecer en ocasiones - de manera natural - una concentración basal del mismo en suelos y aguas (Pérez García & Azcona Cruz, 2012).

Ya en el ambiente, se moviliza especialmente en suelos ácidos, lo que facilita su absorción por las plantas y, por ende, su incorporación en la cadena alimenticia, representando un riesgo significativo para la salud humana y animal (Huaraca-Fernández et al., 2020). Su presencia también puede deberse a causas antropogénicas, contaminando suelos agrícolas a través de fertilizantes, pesticidas, entre otros; las prácticas agrícolas intensivas y el uso de aguas

contaminadas pueden incrementar la concentración de cadmio en los productos agrícolas (Huaraca-Fernández et al., 2020).

Investigaciones evidencian que la contaminación de cadmio en el suelo de origen natural, representa solo el 10% del total en comparación con las fuentes antropogénicas (Cloquet et al., 2006); asimismo se ha demostrado que, concentraciones elevadas de cadmio pueden afectar negativamente el crecimiento radicular, reducir la eficiencia de procesos metabólicos críticos y disminuir el rendimiento.

Según Soto et al. (2021), un suelo agrícola está contaminado cuando su concentración total excede de 1.4 mg/kg de Cd total, según los estándares de Calidad Ambiental para suelo establecido en el DS 002-2013-MINAM-Perú.

Araújo et al. (2017), sostiene que, este elemento metálico es altamente móvil en el floema, puede acumularse en la estructura interna de la planta y promover perturbaciones como daños a la maquinaria fotosintética, al metabolismo antioxidante, a la expresión génica y daños irreversibles a la ultraestructura celular y radicular, afectando así el crecimiento y desarrollo de las plantas de cacao CCN 51.

2.2.7. *Absorción de nutrientes*

La absorción de nutrientes en plantas es un proceso complejo que depende de la interacción entre las características del suelo, la fisiología de la raíz y las condiciones ambientales. Este proceso ha sido descrito como un sistema integrado en el que la disponibilidad de nutrientes está determinada por factores edáficos y la capacidad de las raíces para captar y transportar iones (Marschner, 2012).

Anokye et al. (2021) refieren que, la disponibilidad de potasio en concentraciones óptimas modula de manera positiva la absorción y distribución de nutrientes en plántulas de cacao; este macronutriente favorece la regulación osmótica y el mantenimiento de la fotosíntesis, incluso bajo condiciones de estrés hídrico, contribuyendo a una adecuada

conductancia estomática, al incremento del contenido relativo de agua y a una mayor eficiencia fotosintética. En consecuencia, la presencia de este elemento, no solo potencia su propia absorción, sino que también optimiza la respuesta fisiológica general de la planta frente a ambientes limitantes.

La dinámica de absorción de elementos esenciales como nitrógeno, fósforo y potasio se ve modulada por factores edáficos como el pH y la presencia de metales pesados; la influencia del pH sobre la solubilidad de nutrientes y metales, así como su efecto en la absorción de macronutrientes y la competencia con elementos tóxicos como el cadmio, ha sido documentada en cultivos tropicales incluyendo cacao (Gramlich et al., 2017; Barraza et al., 2017).

2.2.8. Factores que influyen en la absorción de cadmio

Según Nan et al. (2002), la absorción de Cd es un proceso influenciado por factores edáficos (origen y forma química de los elementos en el suelo, pH, CIC, material orgánico) y del cultivo (especies, tejidos y edad de la planta, entre otros). En suelos ácidos se incrementa la disponibilidad del metal; sin embargo, la salinidad también favorece su absorción; la deficiencia de micronutrientes como zinc y manganeso puede aumentar su absorción, mientras que los macronutrientes pueden ejercer un efecto variable; así mismo, la temperatura, por su parte, promueve la absorción cuando es elevada (Soto et al., 2021).

Huaraca-Fernández et al. (2020) refiere que, la absorción de Cd muestra una relación lineal indirecta - relación inversa - a medida que el pH disminuye, su disponibilidad aumenta; en contraste, cuando el pH del suelo se eleva, el Cd es retenido por los coloides, limitando su movilidad y disponibilidad para los organismos.

Su absorción está limitada por la capacidad de intercambio catiónico (CIC), factor basado en las cargas de los coloides inorgánicos (arcillas) principalmente, y coloides orgánicos (materia orgánica, humus) que lo adsorben ligándolo fuertemente a su estructura; en

condiciones adversas, son desligados de las arcillas incrementando así su disponibilidad en la solución suelo (Huaraca-Fernández et al., 2020). En presencia de materia orgánica, forma también quelatos con la misma, reduciendo su fitodisponibilidad (Singh y Prasad, 2014).

En la estructura vegetal, se acumula principalmente en las hojas, seguidas por los granos y las raíces, siendo, las hojas más antiguas las que presentan mayores niveles de este metal en comparación con las más jóvenes (Soto et al., 2021).

Ramtahal, G. et al. (2016) menciona que la bioacumulación de Cd se da principalmente en hojas seguido por el fruto, cáscara, y finalmente granos o semillas; esta tendencia es consistente entre órganos o tejidos de una misma planta, sin embargo, no aplica en la variedad ecuatoriana.

2.2.9. Ingreso, movilización y mecanismos de regulación o tolerancia de T. cacao frente a la presencia de Cd

El cadmio (Cd^{2+}) ingresa a las raíces de las plantas principalmente por tres vías: intercambio iónico pasivo en la epidermis facilitado por H^+ derivados de la respiración (vía apoplástica); mimetismo con nutrientes esenciales como Fe^{2+} o Zn^{2+} a través de transportadores no específicos como IRT1 y LCT1 (vía simplástica); y mediante quelatos Cd-ácidos mugineicos absorbidos por proteínas tipo YSL (Song, Jin, & Wang, 2017).

Una vez dentro, su movilidad hacia el tallo es regulada por mecanismos de retención en raíces (quelación) con fitoquelatinas y glutatión en vacuolas, barreras de suberina en exodermis y endodermis, y control del transporte entre xilema y floema (Mendoza-Cózatl, Jobe, Hauser, & Schroeder, 2011).

Otros mecanismos de tolerancia son el incremento del sistema antioxidante, la regulación de la homeostasis celular, la producción de reguladores del crecimiento y la reestructuración metabólica (de las células afectadas), según lo revisado por Hernández-

Baranda et al. (2019); asimismo refiere también que, el lugar de acumulación de metales pesados son las vacuolas, incluyendo los esenciales como Zn^{2+} y Fe^{2+} .

El Cd aprovecha rutas fisiológicas diseñadas para elementos esenciales, pero la planta activa barreras bioquímicas y estructurales para limitar su toxicidad.

2.2.10. Efectos morfológicos y fisiológicos del cadmio

A nivel morfológico, Castro et al. (2015), han evidenciado deformación de los cloroplastos, reducción del espesor del mesófilo, y disminución del espesor de la epidermis (en la cara abaxial) en especies de *T. cacao* expuestas al contaminante; asimismo, a nivel fisiológico, mostró alteraciones en la condensación de la cromatina nuclear, ejercen efecto también en las raíces: incrementando la actividad enzimática de la guayacol peroxidasa, y ejerciendo una mayor expresión de los genes asociados con la biosíntesis de fitoquelatina (PC_S-1) y metalotioneína (MT2b), y en las hojas: la biosíntesis de fitoquelatina (PC_S-1), aumento en la actividad de las enzimas antioxidantes como las peroxidasas clase III (PER-1) y el superóxido dismutasa citosólica dependiente de cobre y zinc (Cu-Zn SOD_{Cyt}).

En respuesta, Inouhe (2005) menciona que, las fitoquelatinas (PC) quelan el Cd, formando complejos de distintos pesos moleculares inhibiendo su toxicidad y en ocasiones, lo eliminan en la vacuola; de igual manera, Lee, S., et Korban, S. S. (2002) confirman que la acumulación de PC se ha observado como respuesta al estrés por metales pesados.

No obstante, Shahid et al. (2016) refiere que, la fitotoxicidad del Cd disminuye la absorción de nutrientes, inhibe la fotosíntesis, el crecimiento y la respiración de las plantas, induce la peroxidación lipídica y altera el sistema antioxidante y el funcionamiento de las membranas; sin embargo, las plantas abordan su toxicidad mediante diferentes estrategias de defensa, como el secuestro en vacuolas u otros mecanismos que implican la inducción de fitoquelatinas, glutatión y ácido salicílico.

En cuanto a su transporte, absorción y acumulación, distintos genotipos de cacao revelan que, muestra alta afinidad por las raíces; a diferencia de su translocación a las hojas, la cual varía según el genotipo (Meléndez Mori, 2021). Por otro lado, Guo et al. (2008) menciona que, en altas concentraciones, su toxicidad afecta directamente el desarrollo de las plantas, generando retraso en el crecimiento, clorosis, enrojecimiento de las puntas de las raíces y conduce a su muerte.

2.3. Definición de Términos

- a. **Metal pesado:** elemento químico con alta densidad y peso atómico elevado, que puede ser tóxico para los organismos vivos y el medio ambiente; no son biodegradables y tienden a bioacumularse en los tejidos de los seres vivos, afectando la salud y los ecosistemas (Romero Ledezma, 2009, p. 45).
- b. **Bioacumulación:** proceso mediante el cual organismos vivos absorben y retienen sustancias químicas del medio ambiente, generalmente a través de la alimentación, el agua o la exposición directa; absorben sustancias tóxicas más rápido de lo que pueden eliminarlas (Romero Nájera, 2024).
- c. **Biodisponibilidad:** es una fracción de la concentración total de una sustancia química que puede ser absorbida por organismos (plantas y microorganismos), en contraste con la cantidad total presente en el entorno (Huaraca-Fernández et al., 2020).
- d. **Genotipo:** conjunto de genes de un organismo que determina sus características hereditarias, información genética contenida en el ADN que influye en el desarrollo de rasgos físicos y biológicos (National Human Genome Research Institute, 2025).
- e. **Semilla botánica:** estructura reproductiva de las plantas con flores (angiospermas) y algunas gimnospermas, que contiene el embrión y las sustancias de reserva

necesarias para su desarrollo cuya función principal es la propagación y perpetuación de la especie (Doria, 2010, p. 74).

- f. Plántulas:** plantas en los primeros estadios de desarrollo, desde la germinación hasta la aparición de las primeras hojas verdaderas (Soto et al., 2021).
- g. Plantones:** plantas con hojas verdaderas que aún permanecen en bolsas almacigueras o de propagación, bajo condiciones controladas (Soto et al., 2021).

CAPÍTULO III

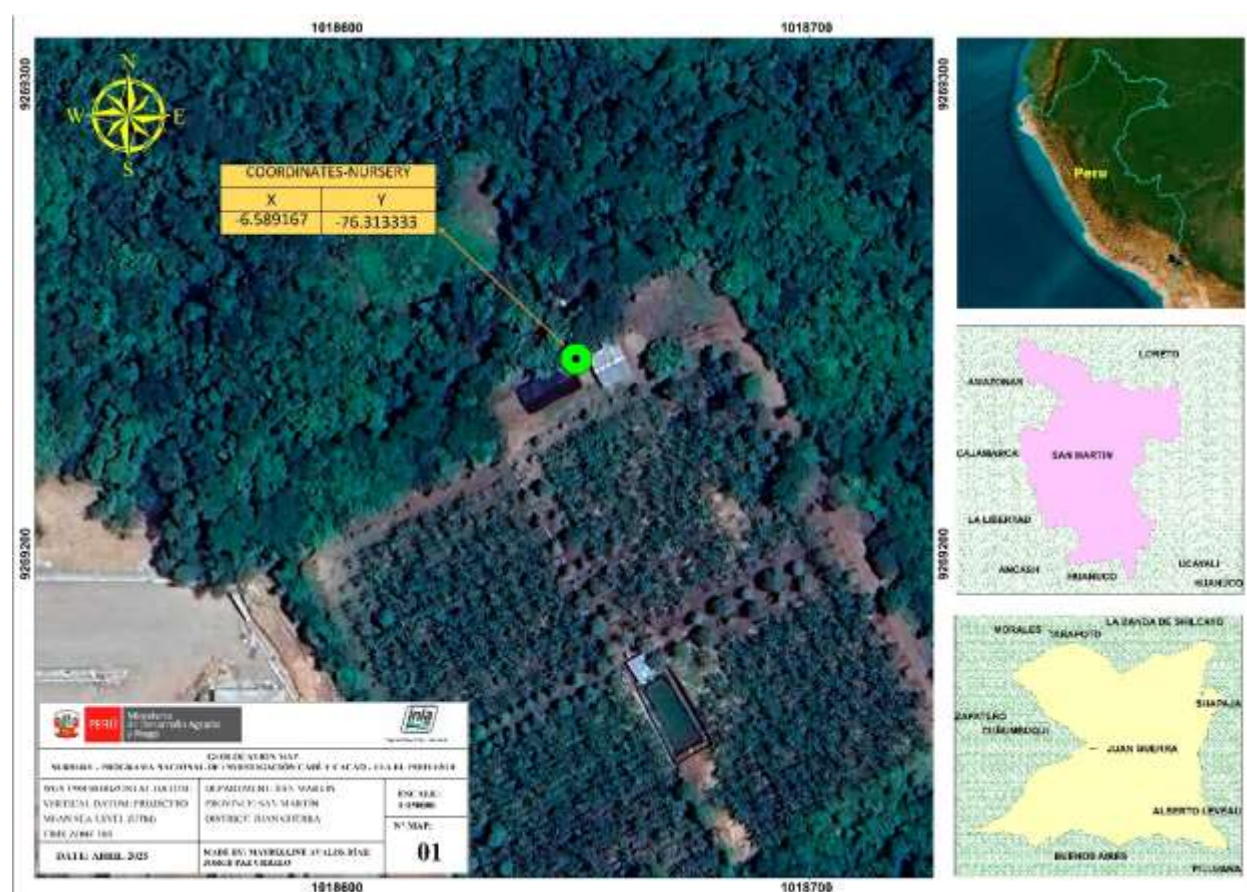
MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Ubicación

La investigación fue realizada en la estación experimental El Porvenir, del Instituto de Innovación Agraria (INIA); ubicado en el Km. 14.5 Carretera Tarapoto – Juanjuí, Distrito Juan Guerra, Provincia y Departamento de San Martín. Con coordenadas UTM 18 354832 9271224 a una altitud de 330 msnm.

Figura 1

Mapa de ubicación de la investigación.



Fuente: Elaboración propia.

3.2. Materiales y Equipos

3.2.1. *Material vegetal*

Para la presente investigación, se emplearon semillas de los siguientes genotipos:

- ✓ CCN – 51.
- ✓ IMC – 67.
- ✓ ICS – 39.
- ✓ TSH – 565.

3.2.2. *6.2.2. Material de campo*

- ✓ Bolsas almacigueras.
- ✓ Malla raschel.
- ✓ Mochila fumigadora.
- ✓ Regadera.
- ✓ Vernier digital.
- ✓ Sacos plásticos.
- ✓ Etiquetas.
- ✓ Marcador indeleble, regla.
- ✓ Cinta métrica.
- ✓ Libreta de campo.

3.2.3. *6.2.3. Materiales y equipos de laboratorio*

- ✓ Hidrato de cloruro de cadmio (CdClH_2O).
- ✓ Balanza analítica.
- ✓ Digestor HotBlock
- ✓ Espectrofotómetro de emisión atómica por plasma de microondas (MP-AES).
- ✓ Medidor de clorofila – Spad.
- ✓ Laptop.

3.3. Metodología

La presente investigación es de tipo experimental, realizado bajo condiciones de vivero y laboratorio, en las instalaciones de la EEA El Porvenir en la región San Martín.

3.3.1. Variables

Tabla 1.

Variables dependientes e independientes.

Tipo de variable	Variable	Definición conceptual	Indicadores	Técnicas e instrumentos	Unidad de observación
Dependientes	Morfológicas	Representadas por el diámetro de tallo, el número de hojas y altura de planta de los genotipos mencionados.	Plantillas de evaluación	Regla, cinta métrica, vernier digital.	Unidades (und) Centímetros (cm)
	Fisiológicas	Vinculadas a las concentraciones de Cd en tallo, hojas y raíz.	Reportes de laboratorio - análisis químico	Espectrofotometría de Emisión Atómica	ppm
		Contenido de clorofila.		Medidor de clorofila SPAD	nm
Independientes	Genotipos de cacao	Plantas propagadas mediante semilla provenientes de: CCN 51, IMC 67, ICS 39 y TSH 565.	Semillas/plantas	Germinación de genotipos de cacao	planta
	Dosis de Cd	Dosis empleadas: 0, 6 y 12 ppm. Fuente contaminante: Hidrato de cloruro de cadmio ($\text{CdCl}_2\text{H}_2\text{O}$).	Sustrato contaminado con $\text{CdCl}_2\text{H}_2\text{O}$	Inoculación del sustrato con $\text{CdCl}_2\text{H}_2\text{O}$	ppm

3.3.2. *Diseño experimental*

Se empleó un Diseño Completamente al azar (DCA) con arreglo factorial de 4 x 3 considerando dos factores:

Factor A (Genotipos de cacao): 4 niveles (a₁: CCN-51, a₂: IMC-67, a₃: ICS-39, a₄: TSH-565)

Factor B (Concentración de Cd): 3 niveles (b₁: 0 ppm, b₂: 6 ppm, b₃: 12 ppm)

Cada combinación factorial cuenta con 3 repeticiones, con un total de 36 unidades experimentales, cada una contará de 4 plántulas propagadas por semilla botánica, resultando un total de 144 plántulas. Las unidades experimentales fueron distribuidas al azar dentro del vivero para reducir el sesgo asociado a la variabilidad ambiental.

Tabla 2.

Características del experimento.

Características del Área Experimental	
Número de tratamientos	12
Número de repeticiones	3
N° de plantas por tratamiento	4

Tabla 3

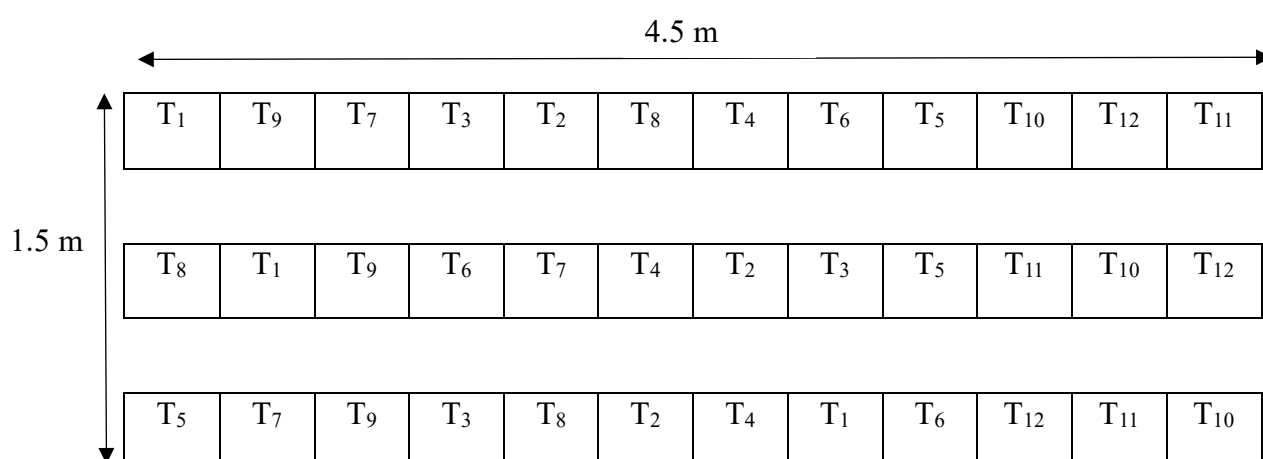
Tratamientos y randomización.

Tratamientos		Randomización		
Clave de Tratamiento	Nombre del tratamiento	Rep. 1	Rep. 2	Rep. 3
T ₁	CCN 51 / 0 ppm	T ₁	T ₈	T ₅
T ₂	CCN 51 / 6 ppm	T ₉	T ₁	T ₇
T ₃	CCN 51 / 12 ppm	T ₇	T ₉	T ₉
T ₄	IMC 67 / 0 ppm	T ₃	T ₆	T ₃
T ₅	IMC 67 / 6 ppm	T ₂	T ₇	T ₈

T ₆	IMC 67 / 12 ppm	T ₈	T ₄	T ₂
T ₇	ICS 39 / 0 ppm	T ₄	T ₂	T ₄
T ₈	ICS 39 / 6 ppm	T ₆	T ₃	T ₁
T ₉	ICS 39 / 12 ppm	T ₅	T ₅	T ₆
T ₁₀	TSH 565 / 0 ppm	T ₁₀	T ₁₁	T ₁₂
T ₁₁	TSH 565 / 6 ppm	T ₁₂	T ₁₀	T ₁₁
T ₁₂	TSH 565 / 12 ppm	T ₁₁	T ₁₂	T ₁₀

Figura 2

Distribución de las unidades experimentales.



3.3.3. Procedimiento

a. Fase de campo

➤ Material genético

Se colectaron mazorcas maduras de plantaciones de la institución de los genotipos: CCN 51, IMC 67, ICS 39, TSH 565, de las cuales se extrajeron las semillas centrales en mejores condiciones físicas observables como tamaño y forma. La desinfección de las semillas se realizó mediante el uso de ceniza, con un promedio de 500g por genotipo; seguidamente se efectuó el proceso de desmucilago con 1000g de aserrín

aproximadamente por genotipo, para eliminar la capa mucilaginosa que recubre las semillas y proceder con el pregerminado.

➤ **Proceso de pregerminado**

Tuvo una duración de cuatro días, hasta la aparición de las radículas, las mismas que indicaron el momento oportuno para la siembra en las bolsas almacigueras que contenían el sustrato contaminado (Ver figura 16).

➤ **Preparación del sustrato**

El sustrato se preparó a partir de un suelo procedente del distrito de Pucacaca, provincia de Picota; con pH moderadamente alcalino (8.1), textura franco arenoso, y CICE alta (30.97). El mismo, fue contaminado con tres dosis de $\text{CdCl}_2\text{H}_2\text{O}$ (0, 6 y 12 ppm). Las dosis fueron preparadas en el laboratorio de suelos (LABSAF – INIA, EEA El Porvenir). A continuación, se detalla los cálculos de las dosis realizados para la contaminación del sustrato:

1. Cálculo de la capacidad de campo (CC) del sustrato

Se pesó 01 kg del sustrato y se añadió agua hasta llegar a la CC. Se usó 50 ml de agua por kg de sustrato.

2. Cálculo del Cd

- Se usó Cloruro de Cd monohidratado ($\text{CdCl}_2\text{H}_2\text{O}$)
- Se calculó el peso molar de $\text{CdCl}_2\text{H}_2\text{O}$, igual a 201.32 g/mol
- Se calculó el peso molar de Cd, igual a 112.41 g/mol
- Se calculó el porcentaje de pureza de Cd del $\text{CdCl}_2\text{H}_2\text{O}$

Si 201.32g $\text{CdCl}_2\text{H}_2\text{O}$ ----- 100 %

112.41 Cd ----- X

El porcentaje de pureza de Cd es 55.8 %

3. Cálculo de la cantidad de sustrato a infestar (contaminar).

La cantidad de sustrato empleada es de 140 kg, para cada concentración de Cd (0, 6 y 12 ppm).

- 6 ppm $\rightarrow$ 6 mg/kg

Para 140 kg: $6 \times 140 = 840 \text{ mg/kg}$

Dónde

$$112.41 \text{ g Cd} \text{ ----- } 201.32 \text{ g CdCl}_2\text{H}_2\text{O}$$

$$0.84 \text{ g Cd} \text{ ----- } X$$

$$X = 1.5 \text{ g CdCl}_2\text{H}_2\text{O}$$

- 12 ppm $\rightarrow$ 12 mg/kg

Para 140 kg: $12 \times 140 = 1680 \text{ mg/kg}$

Dónde

$$112.41 \text{ g Cd} \text{ ----- } 201.32 \text{ g CdCl}_2\text{H}_2\text{O}$$

$$1.68 \text{ g Cd} \text{ ----- } X$$

$$X = 3.0 \text{ g CdCl}_2\text{H}_2\text{O}$$

- Cantidad de agua para capacidad campo

$$1 \text{ kg de suelo} \text{ ---- } 50 \text{ ml de H}_2\text{O}$$

$$140 \text{ kg de suelo} \text{ ---- } X$$

$$X = 7000 \text{ ml} = 7\text{L (volumen total Cd+H}_2\text{O)}$$

❖ Para 6 ppm

Se disuelven 1.5 g CdCl₂H₂O en 7000 ml de H₂O.

❖ Para 12 ppm

Se disuelven 3 g CdCl₂H₂O en 7000 ml de H₂O.

4. Infestación de Cd al sustrato

Cálculo para infestar cada 20 kg de sustrato

6 ppm

140 kg de suelo ---- 7 000 ml H₂O

20 kg de suelo ---- X

X = 1 000 ml de solución de CdCl₂H₂O

12 ppm

140 kg de suelo ---- 7 000 ml H₂O

20 kg de suelo ---- X

X = 1 000 ml de solución de

CdCl₂H₂O

Para facilitar la infestación del sustrato se pesó cada 20 kg, luego el suelo, se extendió en una manta dejando una lámina delgada, con la ayuda de la mochila fumigadora, se añadieron 1000ml de solución de CdCl₂H₂O para 6 ppm, se mezcló el sustrato de manera uniforme hasta terminar la solución, este proceso se repitió hasta concluir con los 140 kg de suelo. La misma metodología se usó para la infestación de 12 ppm.

5. Incubación del Cd en el suelo

El proceso de incubación fue de 30 días bajo sombra, con un intervalo de un día se removió el sustrato.

➤ Aplicación de dosis de Cd

Fueron aplicadas al suelo mediante mochilas fumigadoras, según dosis definidas (0, 6 y 12 ppm).

b. Fase de Vivero

➤ Siembra de semillas en bolsas almacigueras

Una vez emergidas las radículas, las semillas fueron sembradas en bolsas almacigueras conteniendo el sustrato contaminado con las tres dosis (0, 6 y 12

ppm) de hidrato de cloruro de cadmio ($\text{CdCl}_2\text{H}_2\text{O}$); donde permanecieron durante tres meses, periodo durante el cual, los plantones fueron desarrollándose desde sus primeros estadios absorbiendo cadmio (Ver figura 19).

➤ **Distribución de los tratamientos**

Los doce tratamientos fueron distribuidos al azar, y las plantas conducidas mediante riego manual, con regadera, y uso exclusivo de agua de lluvia.

➤ **Deshierbo**

Los deshierbos fueron realizados de forma manual.

➤ **Evaluación en vivero**

Las variables morfológicas evaluadas fueron: altura de planta, número de hojas y diámetro de tallo; en el primer caso, se tomaron las medidas haciendo uso de regla milimétrica; para el número de hojas, se efectuó mediante un conteo visual, así mismo, el diámetro de tallo fue medido haciendo uso de un vernier digital. Estas variables fueron evaluadas en cuatro ocasiones secuenciales, con intervalos de tiempo de quince días: 60, 75, 90 y 105 días después del trasplante (DDT) en las bolsas almacigueras.

c. Fase de laboratorio

➤ **Concentración de cadmio**

Fueron sacrificadas las cuatro plantas de cada tratamiento para analizar la concentración de cadmio en tallos, hojas y raíces. El material vegetal (hojas, raíces y tallos) fueron secados a estufa a 75°C durante 72 horas, y posteriormente molidos en un molino foliar. La extracción de Cd fue realizada dentro de una cabina extractora de gases, mediante digestión ácida (nitrato-perclórico), para lo cual se pesaron 0.5g de muestra en tubos de digestión, añadiendo inicialmente 5ml

de ácido nítrico (1:1) y calentando a 95°C en un digestor HotBlock durante 15 minutos y se dejaron enfriar, luego se añadieron 2.5ml de ácido nítrico concentrado y se calentaron durante 30 minutos más, se enfriaron nuevamente, se adicionó 1ml de agua destilada y 1.5ml de peróxido de hidrógeno (H₂O₂) al 30% y se volvió a calentar a 95°C dejando reaccionar hasta aproximadamente dos horas; tras volver a enfriar, se añadieron 5ml de ácido clorhídrico concentrado y se calentó durante 15 minutos más. Finalmente se diluyó a 50 ml con agua destilada, los residuos fueron filtrados y la solución líquida fue analizada mediante un espectrofotómetro de emisión atómica por plasma de microondas, tomando como referencia los protocolos de ensayo EPA Method 3050B y EPA Method 6010D (EPA, 2014; EPA, 2018).

➤ **Clorofila**

El contenido de clorofila, se evaluó en el tejido foliar mediante un medidor de clorofila portátil (Spad). La medición fue realizada de la parte basal, media y apical de la hoja (Ver figura 23).

3.3.4. Análisis de Datos

a. Análisis estadístico

Los datos de las variables morfológicas (altura de planta y número de hojas) y fisiológicas (concentración de cadmio y contenido de clorofila) fueron analizados mediante análisis de varianza (ANOVA) factorial y test de comparación de medias (Tukey, $P < 0,05$), usando el software estadístico R Project v4.4.1 (R Core Team, 2024).

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. Efectos morfológicos

4.1.1. Variable Diámetro de tallo

El análisis de varianza (Tabla 4) mostró diferencias significativas para clon (C), dosis de Cd (D) y su interacción (C × D) en las evaluaciones a los 60, 75, 90 y 105 DDT, según la prueba F ($p < 0.05$). Los coeficientes de variación (11.5–12.3 %) indican buena precisión experimental para ensayos de campo en especies perennes, conforme a lo establecido por Gómez, K. & Gómez, A. (1984).

Tabla 4

Resumen del Análisis de varianza para la variable Diámetro de tallo (cm) a los 60, 75, 90, y 105 DDT.

FV	GL	Diámetro de tallo (cm)			
		60 DDT	75 DDT	90 DDT	105 DDT
Clon (C)	3	1.606 **	1.557 **	1.396 **	1.238 **
Dosis (D)	2	0.727 *	0.941 **	0.860 **	1.066 **
C * D	6	0.545 **	0.553 **	0.564 **	0.419 *
Error	132	0.160	0.151	0.161	0.165
CV (%)		12.31	11.52	11.61	11.59

* = $p < 0.05$

** = $p < 0.01$

La Tabla 4 muestra que el factor clon presentó diferencias altamente significativas ($p < 0.01$) en todas las evaluaciones, evidenciando la influencia del componente genético sobre el crecimiento del tallo. La dosis de Cd fue significativa desde la primera evaluación ($p < 0.05$) y altamente significativa a partir de los 75 DDT, lo que sugiere un efecto acumulativo del metal sobre el desarrollo. La interacción clon × dosis resultó altamente significativa en los primeros tres periodos y significativa en el último, lo que indica respuestas diferenciales de los clones ante el estrés por Cd y el tiempo de exposición.

Tabla 5

Diámetro de tallo (cm) en los diferentes tratamientos (Clon x Dosis) de las plantas de cacao en diferentes días de evaluaciones.

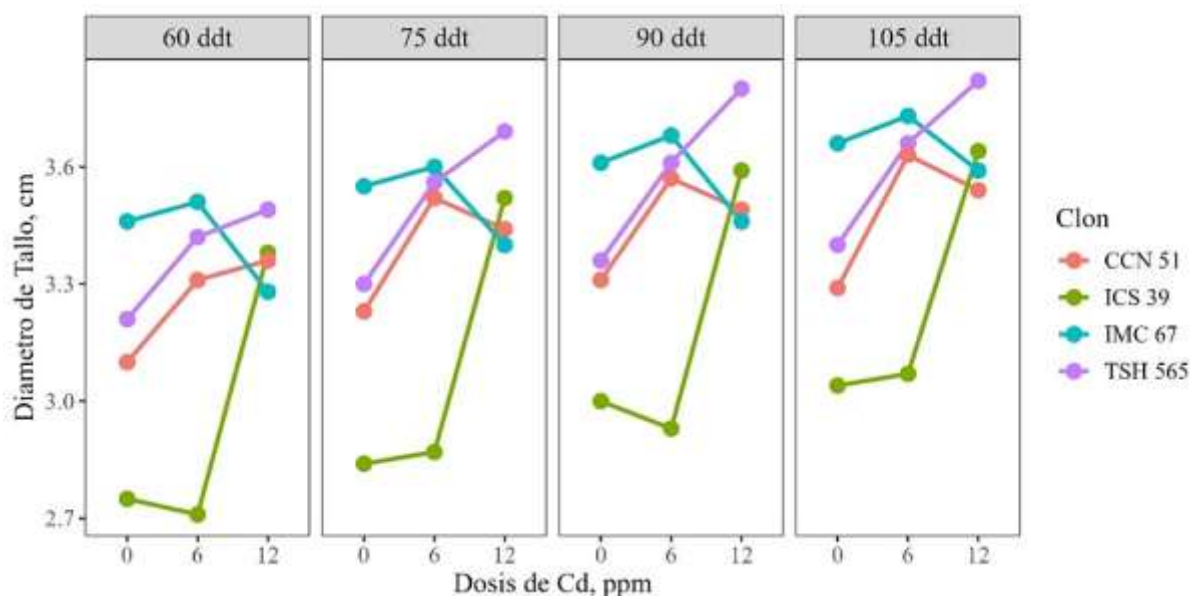
Clon	Dosis (ppm)	Diámetro de tallo (cm)			
		60 DDT	75 DDT	90 DDT	105 DDT
CCN 51	0	3.10 ± 0.24 abc	3.23 ± 0.22 abc	3.31 ± 0.25 abc	3.29 ± 0.34 ab
	6	3.31 ± 0.45 a	3.52 ± 0.33 a	3.57 ± 0.32 a	3.63 ± 0.31 a
	12	3.36 ± 0.16 a	3.44 ± 0.17 a	3.49 ± 0.18 ab	3.54 ± 0.18 ab
ICS 39	0	2.75 ± 0.44 bc	2.84 ± 0.44 c	3 ± 0.48 bc	3.04 ± 0.47 b
	6	2.71 ± 0.57 c	2.87 ± 0.55 bc	2.93 ± 0.55 c	3.07 ± 0.66 b
	12	3.38 ± 0.47 a	3.52 ± 0.51 a	3.59 ± 0.5 a	3.64 ± 0.5 a
IMC 67	0	3.46 ± 0.35 a	3.55 ± 0.33 a	3.61 ± 0.32 a	3.66 ± 0.31 a
	6	3.51 ± 0.34 a	3.6 ± 0.33 a	3.68 ± 0.35 a	3.73 ± 0.35 a
	12	3.28 ± 0.37 ab	3.4 ± 0.32 ab	3.46 ± 0.38 abc	3.59 ± 0.23 ab
TSH 565	0	3.21 ± 0.49 abc	3.3 ± 0.49 abc	3.36 ± 0.48 abc	3.4 ± 0.49 ab
	6	3.42 ± 0.41 a	3.56 ± 0.38 a	3.61 ± 0.38 a	3.66 ± 0.38 a
	12	3.49 ± 0.33 a	3.69 ± 0.41 a	3.8 ± 0.46 a	3.82 ± 0.41 a

Valores promedios (n = 3). Diferencias significativas (p < 0.05) usando Tukey test. Letras diferentes indican diferencias significativas.

En la Tabla 5 se observa que el tratamiento T12 presentaron los mayores diámetros de tallo durante los 75, 90 y 105 DDT, cuando fueron expuestas a la dosis de Cd más alta ((TSH 565 x 12ppm), con valores promedios de 3.69, 3.8 y 3.82 cm respectivamente. Similar comportamiento se evidenció en el tratamiento T9 (ICS 39 x 12ppm), quienes mostraron promedios elevados de diámetro en los cuatro periodos de evaluación. En contraste, los genotipos IMC 67 y CCN 51, evidenciaron los menores promedios respecto a este parámetro evaluado frente el estrés por Cd (Figura 3).

Figura 3

Efectos morfológicos en genotipos de cacao por efecto de tres dosis de Cd.



En la Figura 3, se evidencia que el genotipo TSH 565 mantuvo un comportamiento estable ante la exposición a Cd, seguido por ICS 39. Inversamente las plantas procedentes de los genotipos IMC 67 y CCN 51 mostraron reducciones más marcadas en el diámetro del tallo.

En conjunto, los resultados corroboran que los factores: clon, dosis y su interacción alteran significativamente el crecimiento del tallo, con variaciones atribuibles a diferencias genéticas y mecanismos fisiológicos de respuesta al Cd. La marcada variabilidad genética detectada en los clones coincide con lo reportado por García Rodríguez (2018), quien señaló que estas diferencias podrían estar relacionadas con la arquitectura vascular, actividad meristemática y la capacidad de regulación fisiológica frente al estrés abiótico. El efecto bioacumulativo de la dosis de Cd concuerda con Hernández-Baranda et al. (2019), quienes mencionan que el Cd^{2+} interfiere en la captación de cationes esenciales como Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} y Zn^{2+} , provocando desequilibrios que perturban el crecimiento y desarrollo de su biomasa.

La interacción clon $\times$ dosis, significativa en varias evaluaciones, respalda la hipótesis de respuestas diferenciadas entre genotipos ante el estrés metálico prolongado, tal como lo señalan Villaorduña Hauxwell (2021) y García et al. (2021), quienes asocian este

comportamiento a mecanismos como la inmovilización rizosférica o la síntesis de fitoquelatinas. Araújo et al. (2017) también reportaron reducciones en el diámetro del tallo del clon CCN 51 bajo altas concentraciones de Cd, asociadas a daños en la ultraestructura celular y la disminución de la actividad fotosintética, acompañadas por un aumento en la actividad de enzimas antioxidantes como SOD y GPX.

De acuerdo con Clemens (2006), las plantas pueden responder al estrés por Cd regulando su absorción y transporte o detoxificándolo mediante quelación con fitoquelatinas o ácidos orgánicos. Estos resultados coinciden con lo observado por Villaorduña Hauxwell (2021), quien demostró que ciertos órganos del cacao pueden acumular Cd sin síntomas visibles en etapas tempranas. Finalmente, el presente estudio, revela que el genotipo TSH 565 mostró un grado de tolerancia frente al estrés por Cd, hallazgos que concuerdan con los reportados por Farfán Pinedo (2021), mientras que la reducción en el genotipo IMC 67 sometida a una dosis de 12 ppm coincide con lo señalado por Ortiz, A. et al. (2023) respecto a la sensibilidad de este clon, el cual reflejó reducción en su biomasa tras haber sido sometido a estrés por cadmio y estrés hídrico.

4.1.2. Variable Altura de planta

El análisis de varianza (ANOVA) para la variable altura de planta (**Tabla 6**), advierten que no existió un efecto significativo para la interacción entre los clones de cacao estudiados y las concentraciones de Cd, según la prueba F ($p < 0,05$) respecto a las evaluaciones realizadas a los 60, 75, 90 y 105 DDT.

Tabla 6

Análisis de varianza para la variable Altura de planta (cm) a los 60, 75, 90, y 105 DDT.

FV	GL	Altura de planta (cm)			
		60 DDT	75 DDT	90 DDT	105 DDT
Clon (C)	3	58.761 **	72.753 **	178.765 **	181.915 **
Dosis (D)	2	226.640 **	308.049 **	232.793 **	243.354 **
C * D	6	12.610 NS	7.930 NS	22.787 NS	23.825 NS
Error	132	9.670	10.940	13.232	13.361
CV (%)		15.22	14.27	15.16	14.65

Nota. ** = $p < 0.01$

El análisis de varianza (Tabla 6) mostró efectos altamente significativos ($p < 0,01$) tanto para el factor clon como para la dosis de Cd en todos los intervalos de evaluación (60, 75, 90 y 105 DDT), indicando que ambos factores influyen de manera independiente en el parámetro altura de planta. Sin embargo, no se detectó interacción significativa clon $\times$ dosis en ningún periodo, lo cual advierte un comportamiento independiente en cuanto a clones y dosis. Los coeficientes de variación (CV) oscilaron entre 14,27 % y 15,22 %, lo que respalda la confiabilidad de los datos obtenidos.

Tabla 7

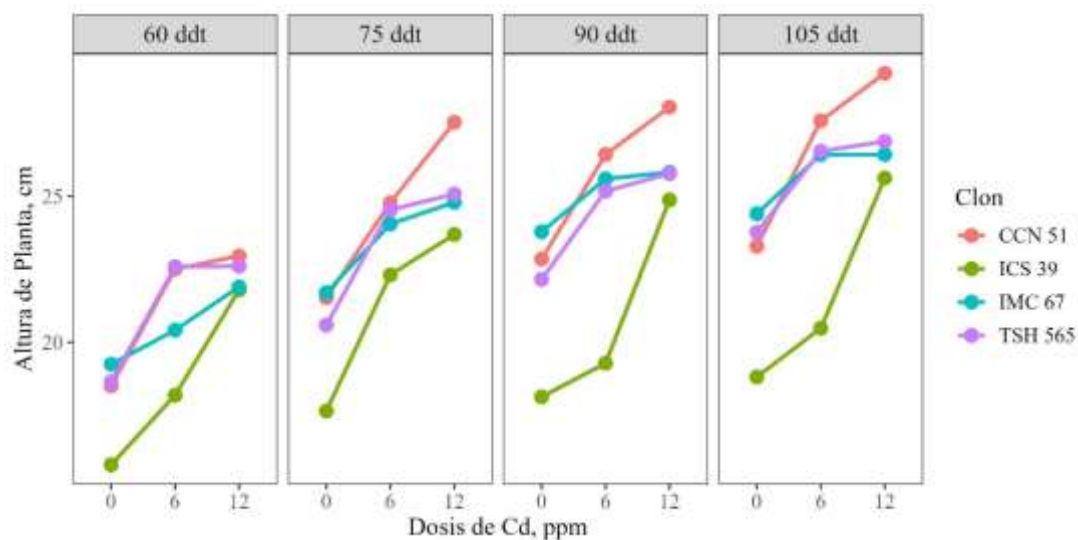
Altura de planta en los diferentes tratamientos (Clon x Dosis) de los genotipos de cacao en diferentes días de evaluaciones.

Clon	Dosis (ppm)	Altura de planta cm			
		60 ddt	75 ddt	90 ddt	105 ddt
CCN 51	0	18.51 ± 2.17 bcd	21.52 ± 2.94 bc	22.85 ± 3.59 bcd	23.29 ± 3.76 bcd
	6	22.51 ± 3.45 ab	24.77 ± 3.48 ab	26.43 ± 4.04 ab	27.58 ± 4.20 ab
	12	22.96 ± 3.28 a	27.53 ± 2.95 a	28.05 ± 3.85 a	29.21 ± 3.93 a
ICS 39	0	15.81 ± 2.76 d	17.65 ± 2.54 c	18.13 ± 2.87 d	18.82 ± 2.84 d
	6	18.19 ± 3.32 cd	22.31 ± 4.95 b	19.28 ± 4.53 cd	20.51 ± 3.77 cd
	12	21.79 ± 3.55 abc	23.69 ± 3.76 ab	24.88 ± 4.04 ab	25.62 ± 4.17 ab
IMC 67	0	19.25 ± 2.99 abcd	21.7 ± 3.96 bc	23.78 ± 3.28 abc	24.40 ± 3.10 abc
	6	20.42 ± 2.29 abc	24.05 ± 2.57 ab	25.6 ± 3.08 ab	26.42 ± 3.03 ab
	12	21.90 ± 2.27 abc	24.79 ± 1.97 ab	25.82 ± 3.03 ab	26.42 ± 3.20 ab
TSH 565	0	18.65 ± 4.44 bcd	20.59 ± 3.64 bc	22.15 ± 4.13 bcd	23.74 ± 4.41 bcd
	6	22.59 ± 3.33 ab	24.53 ± 2.79 ab	25.18 ± 3.04 ab	26.54 ± 2.83 ab
	12	22.61 ± 2.71 ab	25.08 ± 3.08 ab	25.77 ± 3.74 ab	26.88 ± 4.10 ab

En la Tabla 7 se observa de forma general que, las dosis más altas de Cd estuvieron asociadas a mayores valores de altura de planta, destacando el genotipo CCN 51 cuando fue sometido a una dosis de 12 ppm (T3), mostrando valores de 22.96, 27.53, 28.05 y 29.21 cm a los 60, 75, 90 y 105 DDT respectivamente. En contraste, el clon ICS 39 sin contaminación con Cd (0 ppm) registró los menores promedios de altura de planta. Este comportamiento se refleja claramente en la Figura 4, donde se aprecia una tendencia ascendente en la altura de los cuatro genotipos conforme aumenta la dosis de Cd, manteniéndose un patrón similar en los distintos periodos de evaluación.

Figura 4

Altura de planta en genotipos de cacao CCN 51, IMC 67, ICS 39 y TSH 565 por efecto de tres dosis de Cd (0, 6 y 12 ppm), evaluado a los 60, 75, 90 y 105 DDT.



Estos resultados son consistentes con lo reportado por Tuesta Gómez (2022), quien encontró que el genotipo CCN 51 no se vio afectado negativamente en su crecimiento inicial pese a haber bioacumulado mayores concentraciones de Cd en condiciones de baja altitud. De manera similar, Oc Llatance et al. (2018) señalan que *Theobroma cacao* L. puede acumular Cd en raíces y tallos sin manifestar síntomas visibles de toxicidad en etapas tempranas, tal como se advierte en el presente estudio, donde el genotipo CCN 51 continuó su desarrollo aun estando sometida a las dosis más altas de Cd. El patrón uniforme de incremento observado podría estar asociado a mecanismos de tolerancia compensatoria, como la estimulación del alargamiento celular mediado por auxinas y giberelinas, o bien a una respuesta hormética, en la cual bajas concentraciones de Cd promueven el crecimiento vegetal mediante la activación de enzimas antioxidantes (Sharma et al., 2009). En contraste, otras variables como el diámetro del tallo dependen de procesos estructurales como la lignificación, que pueden verse afectados de manera distinta por la exposición prolongada al Cd y variar según el genotipo (Lux et al., 2011).

4.1.3. Variable Número de hoja

Los resultados del análisis de varianza, para la variable número de hojas (**Tabla 8**), advierten que existió significancia entre la interacción de los diferentes genotipos de cacao estudiados y las concentraciones de Cd, respecto a las evaluaciones realizadas a los 75 y 90 DDT según la prueba F ($p < 0,05$). Los coeficientes de variación (CV%) se mantienen dentro de rangos aceptables.

Tabla 8

Resumen del Análisis de varianza para la variable Número de hoja, en diferentes periodos de evaluaciones (60, 75, 90, y 105 DDT).

FV	GL	Número de hojas			
		60 DDT	75 DDT	90 DDT	105 DDT
Clon (C)	3	7.574 **	4.618 *	8.359 **	7.685 NS
Dosis (D)	2	7.021 **	8.521 **	12.715 **	14.646 *
C * D	6	2.623 NS	5.549 **	5.567 *	5.387 NS
Error	132	1.398	1.695	2.088	3.093
CV (%)		17.96	15.36	15.61	18.68

* = $p < 0.05$

** = $p < 0.01$

La Tabla 8, mostró diferencias significativas para el factor clon en los tres primeros periodos de evaluación; en tanto que el factor dosis mostró alta significancia durante los tres primeros periodos de evaluación y un efecto significativo en el último periodo. La interacción clon $\times$ dosis mostró significancia a los 75 y 90 DDT.

Tabla 9

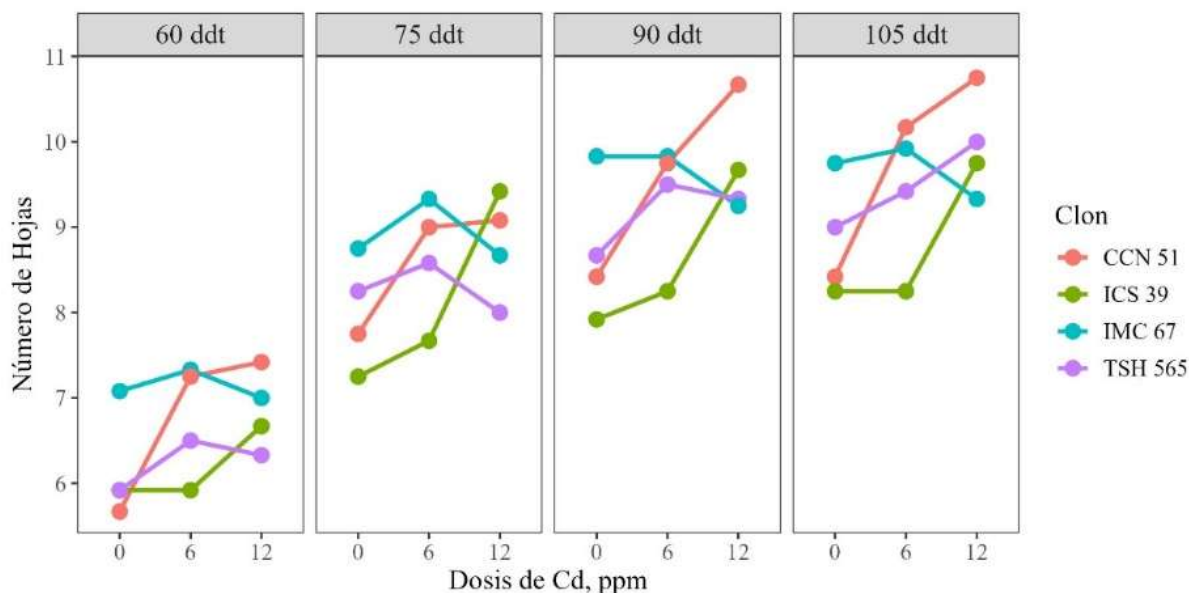
Número de hojas en los diferentes tratamientos (Clon x Dosis) de los genotipos de cacao en cuatro periodos de evaluación.

Clon	Dosis (ppm)	Número de hojas			
		60 ddt	75 ddt	90 ddt	105 ddt
CCN 51	0	5.67 ± 0.89 b	7.75 ± 1.29 ab	8.42 ± 1.16 b	8.42 ± 1.38 ab
	6	7.25 ± 1.36 ab	9 ± 1.54 ab	9.75 ± 1.42 ab	10.17 ± 1.64 ab
	12	7.42 ± 1.16 a	9.08 ± 1.56 a	10.67 ± 2.27 a	10.75 ± 2.38 a
ICS 39	0	5.92 ± 1.24 ab	7.25 ± 0.87 b	7.92 ± 1.51 b	8.25 ± 1.29 b
	6	5.92 ± 1.00 ab	7.67 ± 1.5 ab	8.25 ± 1.6 b	8.25 ± 1.22 b
	12	6.67 ± 1.72 ab	9.42 ± 1.78 a	9.67 ± 1.92 ab	9.75 ± 2.8 ab
IMC 67	0	7.08 ± 1.08 ab	8.75 ± 1.29 ab	9.83 ± 1.11 ab	9.75 ± 1.14 ab
	6	7.33 ± 1.37 a	9.33 ± 1.3 a	9.83 ± 1.34 ab	9.92 ± 3 ab
	12	7.00 ± 0.60 ab	8.67 ± 0.78 ab	9.25 ± 0.97 ab	9.33 ± 0.89 ab
TSH 565	0	5.92 ± 1.44 ab	8.25 ± 1.29 ab	8.67 ± 1.3 b	9 ± 1.54 ab
	6	6.50 ± 0.80 ab	8.58 ± 0.79 ab	9.5 ± 1.09 ab	9.42 ± 1 ab
	12	6.33 ± 1.07 ab	8 ± 1.21 ab	9.33 ± 1.07 ab	10 ± 1.21 ab

En la Tabla 9 y la Figura 5 se observa que, el tratamiento T3 (CCN51 x 12ppm) obtuvo el mayor número de hojas, siendo estadísticamente igual al tratamiento T5 (IMC 67 x 6ppm), con valores de 7.42 y 7.33 respectivamente. En tanto que, en el segundo intervalo de evaluación, los tratamientos T9 (ICS 39 x 12ppm) y T5 (IMC 67 x 6ppm) fueron estadísticamente iguales, con valores promedios de 9.42 y 9.33 respectivamente. A los 90 DDT se observó que el tratamiento T3 destacó con el mayor promedio de numero de hojas (10.67); y finalmente a los 105 DDT, similar comportamiento.

Figura 5

Número de hojas en genotipos de cacao CCN 51, IMC 67, ICS 39 y TSH 565 por efecto de tres dosis de Cd, evaluado a los 60, 75, 90 y 105 DDT.



Comparando con investigaciones previas, Fernández-Paz et al. (2021), observaron reducciones en área foliar en plántulas expuestas a Cd, confirmando que el número de hojas es una variable sensible al estrés metálico. Mishra et al. (2021) también señalan que el Cd limita el desarrollo foliar en sorgo, lo que respalda las diferencias observadas en las etapas intermedias del presente estudio. La capacidad de CCN 51 para mantener mayor número de hojas, incluso a la máxima dosis del metal, concuerda con lo descrito por Galvis et al. (2023), quienes identificaron al CCN 51 como genotipo con tolerancia prolongada y baja acumulación de Cd en brotes. Esto sugiere que mecanismos como la eficiencia fotosintética, la redistribución del Cd hacia órganos menos sensibles y la compensación hormonal (auxinas y giberelinas) podrían permitir a ciertos genotipos sostener su crecimiento foliar bajo exposición crónica al metal, lo que representa una ventaja adaptativa en suelos contaminados.

4.2. Efectos fisiológicos

4.2.1. Variable Clorofila

El análisis de varianza para la variable clorofila (Tabla 10), advierten que no existió un efecto significativo para la interacción entre los clones de cacao y las concentraciones de Cd evaluados a los 90 DDT. Sin embargo, a los 105 DDT según la prueba F ($p < 0,05$) se reporta una interacción significativa entre los clones y las dosis estudiadas.

Tabla 10

Resumen del Análisis de varianza para la variable Clorofila a los 90, y 105 DDT.

FV	GL	Clorofila (cm)	
		90 DDT	105 DDT
Clon (C)	3	144.372 *	295.97 **
Dosis (D)	2	73.235 NS	178.893 *
C * D	6	9.487 NS	117.426 *
Error	132	44.493	49.877
CV (%)		30.67	38.34

* = $p < 0.05$

** = $p < 0.01$

La Tabla 10, muestra que a los 90 DDT no existieron efectos significativos de la interacción entre clones y dosis de Cd, lo que indica que en esa etapa temprana el contenido de clorofila se mantuvo estable independientemente del genotipo o la concentración aplicada. Sin embargo, a los 105 DDT se evidenció una interacción significativa ($p < 0,05$), advirtiendo que la respuesta fisiológica en la síntesis de clorofila dependió tanto del genotipo como de la dosis y del tiempo de exposición.

Tabla 11

Clorofila (índice SPAD) en los diferentes tratamientos (Clon x Dosis) de las plantas de cacao en dos periodos de evaluación.

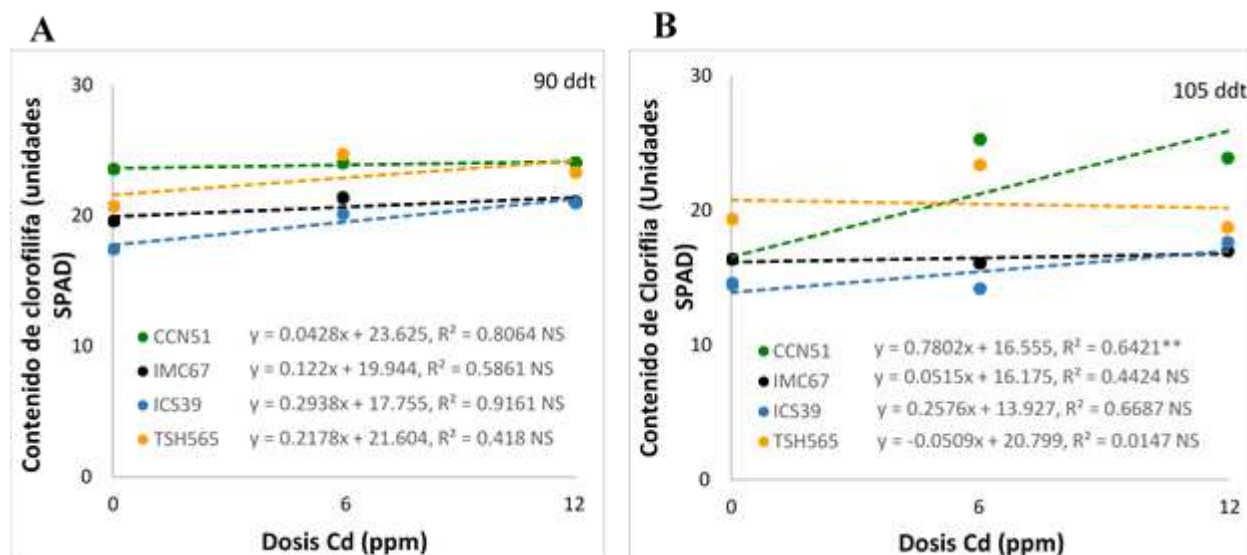
Clon	Dosis	Índice de Clorofila (SPAD)	
		90 DDT	105 DDT
CCN 51	0	23.55 ± 2.28 a	14.54 ± 1.85 b
	6	24.03 ± 1.56 a	25.27 ± 1.35 a
	12	24.07 ± 1.54 a	23.90 ± 2.41 ab
ICS 39	0	17.45 ± 1.17 a	14.56 ± 1.742 b
	6	20.14 ± 2.02 a	14.38 ± 2.01 b
	12	20.97 ± 2.34 a	17.65 ± 2.59 ab
IMC 67	0	19.59 ± 2.25 a	16.38 ± 1.74 ab
	6	21.39 ± 1.68 a	16.08 ± 2.47 ab
	12	21.05 ± 2.21 a	16.99 ± 1.61 ab
TSH 565	0	21.39 ± 2.55 a	19.58 ± 1.58 ab
	6	24.69 ± 1.86 a	23.38 ± 2.43 ab
	12	23.33 ± 1.00 a	18.74 ± 2.34 ab

Nota. Valores promedios (n = 3). Diferencias significativas (p < 0.05) usando Tukey test. Letras diferentes indican diferencias significativas.

En la Tabla 11 se observa que a los 90 DDT ninguno de los clones presentó diferencias significativas respecto a las dosis. En tanto que, a los 105 DDT el tratamiento T2 (CCN 51 x 6ppm) mostró un incremento marcado respecto al control, con un valor de 25.27 unidades SPAD. En contraste, los clones ICS 39, IMC 67 y TSH 565 no presentaron diferencias significativas. Resultados que sugieren que el genotipo CCN 51 posee un mecanismo diferencial de respuesta frente a la exposición moderada de Cd.

Figura 6

Contenido de Clorofila en genotipos de cacao por efecto de tres dosis de Cd, a los 90 y 105 DDT.



Nota. Contenido de Clorofila en genotipos de cacao CCN 51, IMC 67, ICS 39 y TSH 565 por efecto de tres dosis de Cd (0, 6 y 12 ppm). A. 90 DDT. B. 105 DDT.

La Figura 6 complementa estos resultados al mostrar que a los 90 DDT todos los genotipos mantuvieron tendencias similares sin diferencias notorias, mientras que a los 105 DDT destaca CCN 51, donde cerca del 64% de la variación en el contenido de clorofila se explicó por el aumento en la dosis. Esta respuesta diferencial refuerza la idea de que la tolerancia fisiológica al Cd es dependiente del genotipo y del tiempo de exposición.

Estos hallazgos concuerdan con lo reportado por Ronquillo et al. (2024), quienes evaluaron *Theobroma cacao* expuesto a Cd y no encontraron diferencias significativas en clorofila. Asimismo, Araújo et al. (2017) señalaron que el Cd puede provocar reducción de pigmentos cloroplastídicos y afectar la maquinaria fotosintética, lo que podría explicar la disminución observada en ciertos tratamientos a los 105 DDT. De manera similar, Fernández-Paz et al. (2021) encontraron cambios significativos en pigmentos cloroplastídicos en plántulas de cacao a los cinco meses de exposición en suelos enriquecidos con Cd. En conjunto, estos

resultados evidencian que la clorofila es un indicador variable al estrés por metales pesados, cuya expresión varía según el genotipo y el tiempo de exposición, siendo el genotipo CCN 51 el clon con mayor capacidad de mantener su contenido cloroplástico en condiciones de estrés.

4.2.2. Concentración de Cadmio

El análisis de varianza, para la variable Concentración de Cd en raíz, tallo y hojas (**Tabla 12**), advierten que no existió un efecto significativo para la interacción entre los diferentes clones de cacao estudiados y las concentraciones de Cd, según la prueba F ($p < 0,05$).

Tabla 12

Resumen del Análisis de varianza para la variable Concentración de Cadmio (ppm) a los 60, 75, 90, y 105 DDT.

FV	GL	Concentración de Cd (ppm)			
		Raíz		Tallo	Hojas
Clon (C)	3	53.125	NS	82.283 *	124.408 **
Dosis (D)	2	4237.153	*	5263.153 **	5931.602 **
C * D	6	52.899	NS	25.509 NS	35.847 NS
Error	132	52.961		22.245	26.819
CV (%)		64.66		39.28	41.47

* = $p < 0.05$

** = $p < 0.01$

Tabla 13

Respuesta de la concentración de Cd en diferentes órganos vegetales de los genotipos de cacao, frente a la aplicación de tres concentraciones de Cd.

Clon	Dosis (ppm)	Cd Raíz (mg kg ⁻¹)	Cd Tallo (mg kg ⁻¹)	Cd Hojas (mg kg ⁻¹)
CCN 51	0	0.03 ± 0.00 c	0.03 ± 0.00 e	0.03 ± 0.00 e
	6	16.33 ± 8.98 ab	17.68 ± 4.54 abcd	16.21 ± 5.06 bcd
	12	17.85 ± 8.69 ab	23.42 ± 5.30 a	25.29 ± 4.36 a
ICS 39	0	1.46 ± 1.65 c	0.72 ± 1.24 e	1.31 ± 2.26 e
	6	15.41 ± 6.76 ab	15.63 ± 4.32 bcd	16.41 ± 6.92 bcd
	12	19.46 ± 7.25 ab	21.24 ± 6.52 ab	24.60 ± 5.75 a
IMC 67	0	0.60 ± 0.73 c	0.33 ± 0.31 e	0.40 ± 0.37 e
	6	11.44 ± 7.45 b	11.45 ± 4.02 d	12.63 ± 6.42 cd
	12	16.45 ± 10.08 ab	18.56 ± 5.71 abc	18.77 ± 8.87 abc
TSH 565	0	1.28 ± 1.48 c	0.67 ± 0.44 e	0.44 ± 0.41 e
	6	12.13 ± 6.98 b	14.13 ± 4.17 cd	11.60 ± 3.45 d
	12	22.59 ± 13.20 a	20.22 ± 9.52 abc	21.53 ± 7.67 ab

Nota. Valores promedios (n = 3). Diferencias significativas (p < 0.05) usando Tukey test. Letras diferentes indican diferencias significativas.

La Tabla 12 muestra que no se presentó interacción significativa entre clones y dosis de Cd para la acumulación del metal en ninguno de los órganos evaluados (raíz, tallo y hojas). Sin embargo, se detectaron efectos principales de dosis y de clon, siendo el factor dosis el de mayor peso estadístico ($p < 0.01$) en todos los órganos, lo que evidencia una acumulación proporcional al incremento en la concentración aplicada. En cuanto a la respuesta por órganos, se observó que la mayor acumulación ocurrió en tallos y hojas, alcanzando valores de hasta 23.42 y 25.29 mg·kg⁻¹ respectivamente en el genotipo CCN 51 (Tabla 13, Figuras 7, 8 y 9). Mientras que, TSH 565 registró mayor bioacumulación de Cd en raíces (22.59 mg·kg⁻¹).

Figura 7

Concentración de Cd en raíces de los genotipos de *T. cacao*, contaminados con tres dosis de Cd.

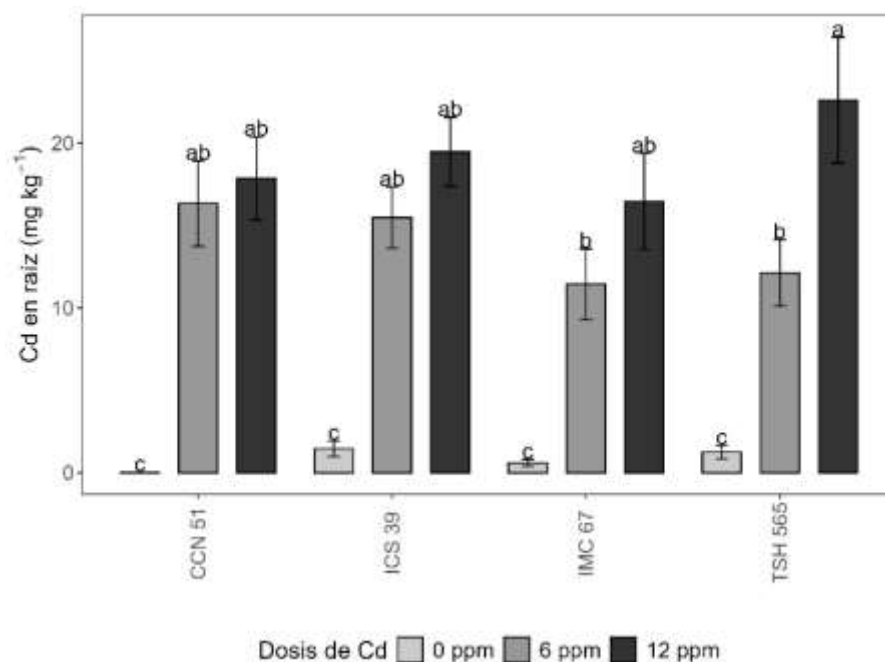
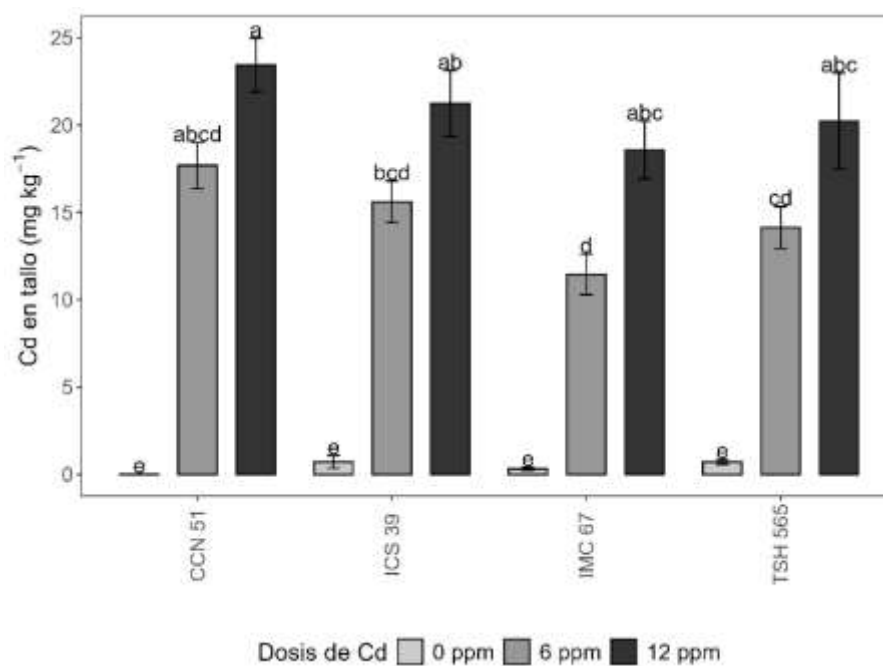


Figura 8



Concentración de Cd en tallos de los genotipos de *T. cacao*, contaminados con tres dosis de Cd.

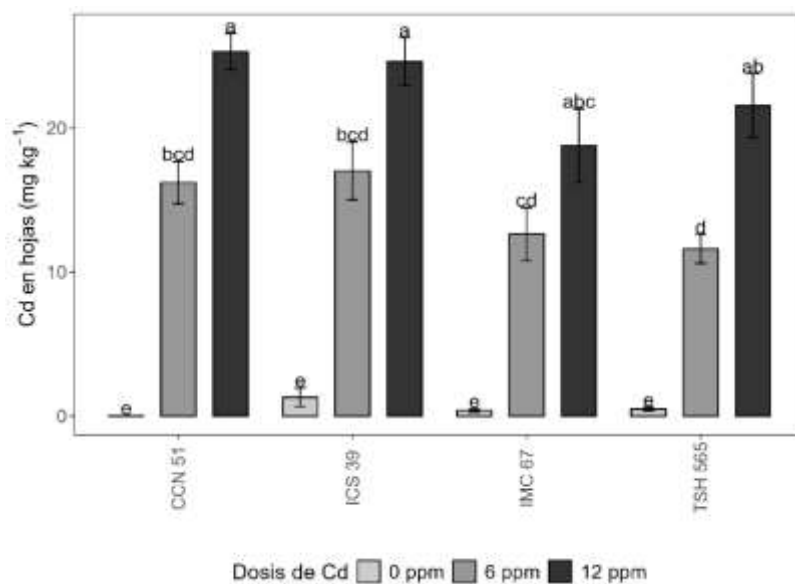


Figura 9

Concentración de Cd en hojas de los genotipos de T. cacao, contaminados con tres dosis de Cd.

En relación con las variables fisiológicas y morfológicas evaluadas (diámetro, altura, número de hojas y clorofila), la acumulación de Cd en los tejidos aéreos mostró correspondencia con un incremento en el crecimiento y un efecto diferenciado entre genotipos. Tal es el caso del genotipo IMC 67, quien acumuló menores concentraciones en órganos subterráneos y aéreos (11.44, 11.45 y 12.63 mg/kg en raíces, tallos y hojas respectivamente), presentando un comportamiento más estable en crecimiento y producción de hojas frente a concentraciones bajas de exposición, evidenciando un posible mecanismo hormético; empero se evidencia sensibilidad al metal con dosis mayores. Lewis et al. (2018), catalogaron a IMC 67 como un genotipo de baja acumulación de Cd. En contraste, el genotipo CCN 51, quien presentó altos niveles de Cd en tallos y hojas (23.42 y 25.29 mg/kg respectivamente), registró respuesta positiva en crecimiento y área foliar; sin embargo, a nivel fisiológico, también se

observaron diferencias en la síntesis de clorofila a los 105 DDT, lo que sugiere que la translocación activa del metal hacia los órganos fotosintéticos podría comprometer su desempeño fisiológico. Estos hallazgos fortalecen la hipótesis que la distribución del Cd dentro de la planta incide directamente sobre la magnitud del estrés manifestado en variables de crecimiento y desarrollo.

La discusión de estos resultados resalta el patrón de acumulación diferencial del Cd en cacao, en concordancia con estudios previos. En raíces, aunque los valores registrados en este estudio fueron inferiores a los reportados por Meléndez-Mori et al. (2023), quienes registraron hasta $112.24 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, se confirma que este órgano actúa como la primera barrera de absorción del metal, con valores que, en algunos genotipos como TSH 565, superaron los $22 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. En tallos y hojas, los niveles obtenidos resultaron superiores a los hallados por Villaorduña Hauxwell (2021) y Oliva et al. (2020); pero se alinean con lo observado por Barraza et al. (2017) y Ramtahal et al. (2016), quienes destacaron que los tejidos aéreos acumulan mayor Cd que las estructuras subterráneas. De hecho, en hojas se alcanzaron concentraciones que duplican o triplican las reportadas en otros contextos (Guarín et al., 2024; Ortiz-Álvarez et al., 2023), confirmando que este órgano es el principal sitio de acumulación del metal en plántulas jóvenes.

Desde un enfoque fisiológico, esta preferencia por la acumulación foliar podría relacionarse con los procesos de translocación y compartimentalización del Cd, tal como sugieren Blommaert et al. (2022), quienes refieren el transporte del metal desde las ramas hacia las hojas. Estos resultados conjuntamente, tienen un impacto agronómico directo, ya que la translocación hacia tejidos aéreos anticipa un riesgo elevado de contaminación en el grano durante etapas avanzadas de desarrollo, lo que representa un desafío para la inocuidad del cacao peruano frente a las restricciones del mercado internacional.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CCN 51 mostró una tendencia positiva superior tanto en altura de planta, como en número de hojas, ostentando que la presencia del metal en etapas tempranas, no influye en mayor grado en su desarrollo vegetativo; posicionándose como una alternativa sobresaliente en suelos contaminados con cadmio.

No obstante, la variabilidad genotípica encontrada con TSH 565 más acumulador en raíces y CCN 51 en órganos aéreos, mientras que IMC 67 mostró un comportamiento más restringido, pone en evidencia el potencial de seleccionar genotipos que integren una menor bioacumulación, y a su vez, muestren una respuesta estable en zonas de alta exposición al metal. En el contexto peruano, donde ciertas áreas cacaoteras presentan niveles elevados de Cd en el suelo, la selección de clones con menor acumulación de Cd, como IMC 67, junto con la implementación de estrategias de mejoramiento genético o cruzamientos dirigidos con genotipos tolerantes como CCN 51, y prácticas agrícolas que reduzcan la biodisponibilidad del metal en el suelo, son medidas clave para asegurar una producción sostenible y competitiva en mercados internacionales.

Este trabajo de investigación nos permite comprender cómo los factores experimentales influyeron sobre el desarrollo morfológico y fisiológico en órganos vegetativos en etapas tempranas bajo el estrés metálico del Cd para los diferentes genotipos, donde se pudo evidenciar la respuesta positiva del genotipo CCN-5I, ante la presencia y tiempo de exposición del mismo.

CAPÍTULO VI

BIBLIOGRAFÍA

- Agudelo Castañeda, G. A., Cañar Serna, D. Y., Pabón Morales, M. A., Bello Gáfaró, M., & Hernández Nopsa, J. F. (2021). *Manual técnico para la producción de semilla de cacao en vivero para los Santanderes y Boyacá*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Agrosavia). <https://doi.org/10.21930/agrosavia.manual.7404586>
- Andrade-Almeida, J., Rivera-García, J., Chire-Fajardo, G., & Ureña-Peralta, M. (2019). Propiedades físicas y químicas de cultivares de cacao (*Theobroma cacao* L.) de Ecuador y Perú. *Enfoque UTE*, 10(4), 1-12. <https://doi.org/10.29019/enfoque.v10n4.462>
- Araújo, R. P., Almeida, A.-A. F., Pereira, L. S., Mangabeira, P. A. O., Souza, J. O., Pirovani, C. P., Ahnert, D., & Baligar, V. C. (2017). Photosynthetic, antioxidative, molecular and ultrastructural responses of young cacao plants to Cd toxicity in the soil. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 144, 148–157. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.06.006>
- Arévalo-Gardini, E., Arévalo-Hernández, C. O., Baligar, V. C., & Éldo, Z. L. (2017). Acumulación de metales pesados en hojas y granos de cacao (*Theobroma cacao* L.) en las principales regiones productoras de cacao del Perú. *Science of the Total Environment*, 606, 792-800. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.06.122>
- Arévalo-Gardini, E., Obando-Cerpa, M. E., & Zúñiga-Cernades, L. B. (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>
- Anokye, E., Lowor, S. T., Dogbatse, J. A., & Padi, F. K. (2021). Potassium application positively modulates physiological responses of cocoa (*Theobroma cacao* L.) seedlings to drought stress. *Agronomy*, 11(3), 563. <https://doi.org/10.3390/agronomy11030563>

- Barraza, F., Schreck, E., Lévêque, T., Uzu, G., Lopez, F., Ruales, J., Prunier, J., Marquet, A., & Maurice, L. (2017). Cadmium bioaccumulation and gastric bioaccessibility in cacao: A field study in areas impacted by oil activities in Ecuador. *Environmental Pollution*, 229, 950–963. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.07.080>
- Cámara Peruana del Café y Cacao. (2025). *Informe sobre la producción y exportación de cacao en Perú*. Recuperado de <https://camcafeperu.com.pe>
- Castro, A. V., de Almeida, A.-A. F., Pirovani, C. P., Reis, G. S. M., Almeida, N. M., & Mangabeira, P. A. O. (2015). Morphological, biochemical, molecular and ultrastructural changes induced by Cd toxicity in seedlings of *Theobroma cacao* L. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 115*, 174–186. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2015.02.003>
- Cadavid-Vélez, S. (2006). *Características de compatibilidad sexual de algunos clones de cacao y su aplicación en siembras comerciales*. Compañía Nacional de Chocolates, Colombia. 28 p.
- Chupillon-Cubas, J., Arévalo-Hernández, C. O., Arévalo-Gardini, E., Farfán-Pinedo, A., & Baligar, V. (2017). *Acumulación de cadmio en seis genotipos de cacao utilizados como patrón*. Presentado en el 2017 International Symposium on Cocoa Research (ISCR), Lima, Perú, 13-17 de noviembre de 2017.
- Clemens, S. (2006). Toxic metal accumulation, responses to exposure and mechanisms of tolerance in plants. *Biochimie*, 88(11), 1707–1719. <https://doi.org/10.1016/j.biochi.2006.07.003>
- Cloquet, C., Carignan, J., & otros tres autores. (2006). Tracing source pollution in soil using cadmium and lead isotopes. *Environmental Science & Technology*, 40(8), 2525-2530. <https://doi.org/10.1021/es052232+>

- Comisión Europea. (2014). Reglamento (UE) n° 488/2014 de la Comisión, de 12 de mayo de 2014, que modifica el Reglamento (CE) n° 1881/2006 por lo que respecta al contenido máximo de cadmio en los productos alimenticios. *Diario Oficial de la Unión Europea*, L 138, 75-79. <http://data.europa.eu/eli/reg/2014/488/oj>
- Crozier, J. (2012). *Heavy metals in cocoa*. International Workshop on Possible EU Regulations on Cadmium in Cocoa and Chocolate Products. Organized by Nature and Food Quality in the Netherlands (LNV), the European Cocoa Association (ECA), & CAOBISCO.
- Doria, J. (2010). Generalidades sobre las semillas: su producción, conservación y almacenamiento. *Cultivos Tropicales*, 31(1), 74-85. Recuperado de <http://www.scielo.sld.cu/pdf/ctr/v31n1/ctr11110.pdf>
- Farfán Pinedo, A. (2021). *Variabilidad de los atributos físicos y químicos del suelo en sistemas de manejo y el impacto del estrés abiótico en la morfología y fisiología de Theobroma cacao L. en el Perú*. Universidad Nacional Agraria de la Selva. <https://repositorio.unas.edu.pe/bitstreams/13629938-5a26-4c17-b9e0-b704284d32db/download>
- Fernández-Paz, J., Cortés, A. J., Hernández-Varela, C. A., Mejía-de-Tafur, M. S., Rodríguez-Medina, C., & Baligar, V. C. (2021). Rootstock-mediated genetic variance in cadmium uptake by juvenile cacao (*Theobroma cacao* L.) genotypes, and its effect on growth and physiology. *Frontiers in Plant Science*, 12, 777842. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.777842>
- Galvis, D. A., Jaimes-Suárez, Y. Y., Rojas Molina, J., Ruiz, R., León-Moreno, C. E., & Carvalho, F. E. L. (2023). Unveiling Cacao Rootstock-Genotypes with Potential Use in the Mitigation of Cadmium Bioaccumulation. *Plants*, 12(16), 2941. <https://doi.org/10.3390/plants12162941>

- Gamboa-Tabares, J.-A., Rodríguez-Ortiz, J.-A., Gamboa-Tabares, A., Durán-Bautista, E.-H., & Rojas-Vargas, S. (2021). Evaluación agronómica de genotipos de *Theobroma cacao* L. en la Amazonia colombiana. *Biotechnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 19(1), 244-255. [https://doi.org/10.18684/bsaa\(19\)244-255](https://doi.org/10.18684/bsaa(19)244-255).
- García Lozano, J., & Moreno Fonseca, L. P. (2016). *Respuestas fisiológicas de Theobroma cacao* L. en etapa de vivero a la disponibilidad de agua en el suelo. *Acta Agronómica*. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/1699/169943143008.pdf>
- García, L., Urbina, M., & Montenegro, R. (2021). Análisis bibliométrico de investigaciones sobre cadmio en *Theobroma cacao*. *Scientia Agropecuaria*, 12(4), 611–620. http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2077-99172021000400611
- García Rodríguez, J. J. (2018). *Selección por hipoacumulación de metales pesados en clones de cacao (Theobroma cacao L.) cultivados en la UNAS*. Nacional Agraria de la Selva. <https://repositorio.unas.edu.pe/server/api/core/bitstreams/56b11405-347a-4923-aeca-29a21f1f89cb/content>
- Gómez, K. A., & Gómez, A. A. (1984). *Statistical procedures for agricultural research* (2nd ed.). John Wiley & Sons.
- González Aliaga, T. (2018). *Efecto de dos abonos orgánicos en el crecimiento de plantones de cacao (Theobroma cacao L.) de los clones CCN-51 e IMC-67 en vivero*. Repositorio Institucional UNAS. <https://repositorio.unas.edu.pe/server/api/core/bitstreams/743a06b1-7300-4c21-bb47-f17722ef68d7/content>
- Gramlich, A., Tandy, S., Andres, C., Chincheros Paniagua, J., Armengot, L., Schneider, M., & Schulin, R. (2017). Cadmium uptake by cocoa trees in agroforestry and monoculture

- systems under conventional and organic management. *Science of the Total Environment*, 580, 677–686. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.12.014>
- Guarín, D., Martín-López, J. M., Libohova, Z., Benavides-Bolaños, J., Maximova, S. N., Guiltinan, M. J., Spargo, J., da Silva, M., Fernandez, A., & Drohan, P. (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>
- Guo, J., Dai, X., Xu, W., & Ma, M. (2008). Overexpressing GSH1 and AsPCS1 simultaneously increases the tolerance and accumulation of cadmium and arsenic in *Arabidopsis thaliana*. *Chemosphere*, 72(7), 1020-1026. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2008.04.018>
- Gutiérrez R., M., Gómez S., R., & Rodríguez L., N. F. (2011). *Comportamiento del crecimiento de plántulas de cacao (Theobroma cacao L.), en vivero, sembradas en diferentes volúmenes de sustrato*. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 12(1), 33-41. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/4499/449945030004.pdf>
- Huaraca-Fernández, J. N., Pérez-Sosa, L., Bustinza-Cabala, L. S., & Pampa-Quispe, N. B. (2020). Organic amendments in the immobilization of cadmium in contaminated agricultural soils: A review. *Información Tecnológica*, 31(4), 139-148. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642020000400139>
- Infobae Perú. (2023). *Estudio verifica altas concentraciones de cadmio en cacao cultivado en el norte del Perú*. <https://www.infobae.com/peru/2023/10/08/estudio-verifica-altas-concentraciones-de-cadmio-en-cacao-cultivado-en-el-norte-del-peru/>
- Inouhe, M. (2005). Phytochelatins. *Journal of Plant Physiology*, 17(1), 65–78.
- Lee, S., & Korban, S. S. (2002). The transcriptional regulation of *Arabidopsis thaliana* (L.) Heynh. *Planta*, 215(6), 689–693. <https://doi.org/10.1007/s00425-002-0821-6>

- Lewis, C., Lennon, A. M., Eudoxie, G., Umaharan, P., & Campus, A. (2018). Genetic variation in bioaccumulation and partitioning of cadmium in *Theobroma cacao* L. *Science of the Total Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.365>
- Llatance, W., 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), 1156-1165. <https://doi.org/10.21704/rfp.v33i1.1156>
- López Cuadra, Y. M., Cunias Rodríguez, M. Y., & Carrasco Vega, Y. L. (2020). El cacao peruano y su impacto en la economía nacional. *Revista Universidad y Sociedad*, 12(3), 344–352. Recuperado de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2218-36202020000300344&lng=es&tlng=es.
- Loyde de la Cruz, L. A., González Méndez, B., Cruz Avalos, A. M., & Loredó Portales, R. (2022). *Suelos agrícolas y metales pesados, una relación tóxica que se puede remediar*. *Epistemos* (Sonora), 16(33) <https://doi.org/10.36790/epistemos.v16i33.228>
- Lux, A., Martinka, M., Vaculík, M., & White, P. J. (2011). Root responses to cadmium in the rhizosphere: a review. *Journal of Experimental Botany*, 62(1), 21–37. <https://doi.org/10.1093/jxb/erq281>
- Marschner, P. (2012). *Mineral nutrition of higher plants* (3rd ed.). Academic Press.
- Meléndez Mori, J. B. (2021). *Transporte y acumulación de cadmio (Cd) en cinco genotipos de cacao nativo de la región Amazonas*. Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas. Disponible en <https://repositorio.untrm.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14077/2332/Mel%c3%a9ndez%20Mori%20Jegnes%20Benjam%c3%adn.pdf?sequence=2&isAllowed=y>

- 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), 215–227. <https://doi.org/10.1080/26395940.2023.2287710>
- Mendoza-Cózatl, D. G., Jobe, T. O., Hauser, F., & Schroeder, J. I. (2011). Long-distance transport, vacuolar sequestration, tolerance, and transcriptional responses induced by cadmium and arsenic. *Current Opinion in Plant Biology*, 14(5), 554–562. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2011.07.004>
- MIDAGRI (2023). *Observatorio de commodities Cacao*. Recuperado de <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/5264502/%20Commodities%20Cacao%3A%20ene-mar%202023.pdf?v=1697059698#:~:text=En%20el%20primer%20semestre%20del,%20C%20Jun%C3%ADn%20C%20Hu%C3%A1nuco%20y%20Cusco>.
- Ministerio de Salud. (s.f.). ¿Qué son los metales pesados? Recuperado de <https://www.gob.pe/es/47991-que-son-los-metales-pesados>
- Mishra, D., Kumar, S., & Mishra, B. N. (2020). An overview of morpho-physiological, biochemical, and molecular responses of sorghum towards heavy metal stress. En P. de Voogt (Ed.), *Reviews of environmental contamination and toxicology* (Vol. 256, pp. 155–177). Springer. https://doi.org/10.1007/398_2020_61
- Nan, Z., Li, J., Zhang, J., & Cheng, G. (2002). Interacciones entre el cadmio y el zinc y su transferencia en el sistema suelo-cultivo en condiciones reales de campo. *Ciencia del Medio Ambiente Total*, 285(1–3), 187–195. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(01\)00919-6](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(01)00919-6)

- National Human Genome Research Institute. (2025). Genotipo. *Genome.gov*. Recuperado el 6 de junio de 2025, de [Genome.gov](https://www.genome.gov).
- Oc Llatance, W., Chávez, A., & Rodríguez, R. (2018). Bioacumulación de cadmio en el cacao (*Theobroma cacao*) en la Comunidad Nativa de Pakun, Perú. *Revista Forestal del Perú*, 33(1), 63–75. <https://www.researchgate.net/publication/344857452>
- 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>
- Orozco Ortiz, Y. C. (2025). *Impacto de la fermentación y secado sobre el contenido de polifenoles totales en el genotipo de cacao Imperial College Selections 39*. Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD), Escuela de Ciencias Básicas Tecnología e Ingeniería. Disponible en <https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/66919/ycorozcoo.pdf?sequence=1>
- 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(2490). <https://doi.org/10.3390/agronomy13102490>
- Pineda, R. del P., Chica, M. J., Echeverri, L. F., Ortiz, A., Olarte, H. H., & Riaño, N. M. (2012). Influencia de la fermentación y el secado al sol sobre las características del grano de cacao TSH 565 e ICS 60. *Vitae*, 19(1), S288-S290. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/1698/169823914088.pdf>
- Ramírez-Guillermo, M. A., Lagunes-Espinoza, L. C., Ortiz-García, C. F., Gutiérrez Área, O. A., & de la Rosa-Santamaría, R. (2018). Variación morfológica de frutos y semillas de cacao (*Theobroma cacao* L.) de plantaciones en Tabasco, México. *Revista Fitotecnia*

- Mexicana*, 41(2), 117-125. Recuperado de <https://www.scielo.org.mx/pdf/rfm/v41n2/0187-7380-rfm-41-02-117.pdf>
- Ramtahal, G., Chang Yen, I., Bekele, I., Bekele, F., Wilson, L., Maharaj, K., & Harrynanan, L. (2016). Relationships between cadmium in tissues of cacao trees and soils in plantations of Trinidad and Tobago. *Food and Nutrition Sciences*, 7(1), Article 63039. c
- R Core Team. (2024). R: A Language and Environment for Statistical Computing. <https://www.R-project.org>
- Referencia: Motamayor, J. C., Lachenaud, P., Wallace, W. H., Llor, 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>
- Requejo Estela, J., Villegas Panduro, P. P., Zumaeta Sangama de Villegas, D. P., Vásquez Gómez, R., & Ríos Guzmán, J. M. (2024). *Efecto de cuatro tipos de fosfitos en el comportamiento del cacao CCN 51 frente a Moniliophthora roreri y Phytophthora palmivora en el distrito de San Juan Bautista, Padre Abad*. *Revista de Investigación Universitaria*, 14(1). <https://doi.org/10.53470/riu.v14i1.135>.
- Romero Ledezma, K. P. (2009). *Contaminación por metales pesados*. *Revista Científica Ciencia Médica*, 12(1), 45-46. Recuperado de http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1817-74332009000100013
- Romero Nájera, I. (2024). Dime qué comes y te diré qué bioacumulas. *Revista Digital Universitaria (RDU)*, 25(4), 7. <https://doi.org/10.22201/ceide.16076079e.2024.25.4.7>.
- Ronquillo, R. T., Zenteno, M. C., Cabanilla, W. D., Ochoa, D. F., Morán, C. Q., Jazayeri, S. M., Montufar, G. V., Rajasekhar, E., Maddela, N. R., & Villamar-Torres, R. (2024). Morphological variation of *Theobroma cacao* L. affected by increasing doses of heavy

- metals. *Sarhad Journal of Agriculture*, 39(Special Issue 2), 139–144.
<https://doi.org/10.17582/journal.sja/2023/39/s2.139.144>
- Rosas-Patiño, G., Puentes-Páramo, Y. J., Menjivar-Flores, J. C., & Rojas Molina, J. (2019). Efecto del encalado en el uso eficiente de macronutrientes para cacao (*Theobroma cacao* L.) en la Amazonia colombiana. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 20(1), 5-28. https://doi.org/10.21930/rcta.vol20_num1_art:1247.
- Shahid, M., Dumat, C., Khalid, S., Niazi, N. K., & Antunes, P. M. C. (2016). Biodisponibilidad, absorción, toxicidad y desintoxicación del cadmio en el sistema suelo-planta. En P. de Voogt (Ed.), *Reseñas de Contaminación Ambiental y Toxicología* (Vol. 241). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/398_2016_8.
- Sharma, S. S., & Dietz, K. J. (2009). The relationship between metal toxicity and cellular redox imbalance. *Trends in Plant Science*, 14(1), 43–50.
<https://doi.org/10.1016/j.tplants.2008.10.007>
- Singh, A., & Prasad, S. M. (2014). Effect of agro-industrial waste amendment on Cd uptake in *Amaranthus caudatus* grown under contaminated soil: An oxidative biomarker response. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 100, 105–113.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2013.09.005>
- Song, Y., Jin, L., & Wang, X. (2017). Cadmium absorption and transportation pathways in plants. *International Journal of Phytoremediation*, 19(2), 133–141.
<https://doi.org/10.1080/15226514.2016.1207598>
- Soto, E., Mendoza, P., & Aguilar, J. (2021). Manual de buenas prácticas agrícolas para el cultivo de cacao. *Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA)*.
 Obtenido de: <https://hdl.handle.net/11324/21346>
- Thomas, E., Atkinson, R., Zavaleta, D., Rodríguez, C., Lastra, S., Yovera, F., Arango, K., Pezo, A., Aguilar, J., & Tames, M. (2023). Distribución de cadmio en el suelo y los granos de

- cacao en el Perú. *Science of the Total Environment*, 881, 163372. Elsevier.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163372>
- Tuesta Gómez, F. A. (2022). *Bioacumulación del cadmio (Cd) en plantaciones de cacao (Theobroma cacao L.) asociadas a la cooperativa APROCAM en la región Amazonas*. Repositorio UNTRM. <https://repositorio.untrm.edu.pe/handle/20.500.14077/2872>
- U.S. Environmental Protection Agency. (2014). Method 6010D (SW-846): Inductively coupled plasma-atomic emission spectrometry (Revision 4). Washington, DC: U.S. EPA. Disponible en <https://www.epa.gov/esam/epa-method-6010d-sw-846-inductively-coupled-plasma-atomic-emission-spectrometry>
- U.S. Environmental Protection Agency. (2002). *Supplemental guidance for developing soil screening levels for Superfund sites* (OSWER 9355.4-24). Office of Emergency and Remedial Response, Washington, D.C. <https://www.epa.gov/superfund/superfund-soil-screening-guidance>
- U.S. Environmental Protection Agency. (1996). Method 3050B: Acid digestion of sediments, sludges, and soils (Revision 2). Washington, DC: U.S. EPA. Disponible en www.epa.gov/sites/default/files/2015-12/documents/3050b.pdf.
- Valenzuela, J. F., et al. (2021). *Ecofisiología y manejo agronómico en el cultivo de cacao*. Compañía Nacional de Chocolates S.A.S. Recuperado de https://chocolates.com.co/wp-content/uploads/2024/02/PDF_WEB_FOLLETO_FISIOLOGIA_Y_PODAS_CACA_O.pdf
- Villar, G., Yovera, F., Pezo, A., Thomas, E., Roscioli, F., Sandy da Cruz, R., Jimenez, E., Lopez, A., Aguilar, F., Espinoza, E., Davila, C., Chavez Hurtado, C., Lastra, S., Zavaleta, D., Charry, A., & Atkinson, R. (2022). *Caracterización socioeconómica de las cadenas de*

valor de cacao con énfasis en la problemática de cadmio en Piura y Huánuco, Perú.

Alianza Bioversity & CIAT. <https://cgspace.cgiar.org/handle/10568/125328>

Villaorduña Hauxwell, N. A. (2021). *Efecto de diferentes concentraciones de cadmio en suelo aluvial y residual en diferentes órganos de plantones de Theobroma cacao L.* Universidad Nacional Agraria de la Selva. Disponible en repositorio UNAS

CAPÍTULO VII

ANEXOS

Anexo 1: Panel Fotográfico

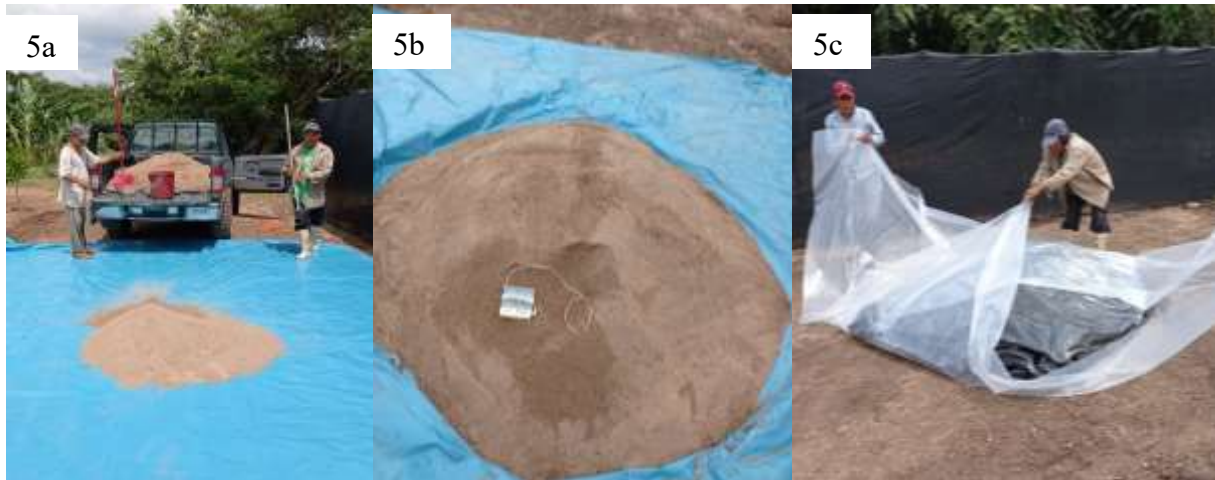
Figura 10

Recolección del sustrato en el distrito de Pucacaca.



Figura 11

Solarización del sustrato.



Nota: Esparcimiento del suelo (5a), control de temperatura (34°C) y humedad (69%) (5b), cubrimiento del sustrato (5c).

Figura 12

*Selección y colecta de mazorcas de *T. cacao*.*



Figura 13

Extracción de semillas

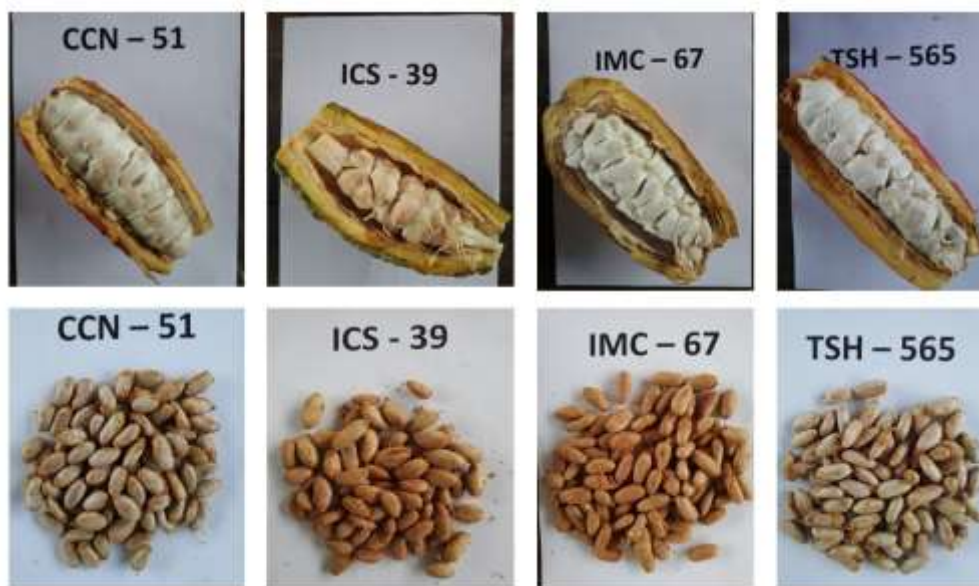


Figura 14

Recolección de ceniza para desinfección de semillas.



Figura 15

Desmucilago de semillas con aserrín.



Figura 16

Pregerminado de semillas.



Figura 17

Preparación de la solución de cloruro de cadmio ($\text{CdCl}_2\text{H}_2\text{O}$).



Figura 18

Llenado de bolsas almacigueras.



Figura 19

Siembra de semillas en bolsas almacigueras.



Figura 20

Crecimiento de las plantas en sustrato contaminado (5 DDT).



Figura 21

Observación de las hojas verdaderas (15 DDT).



Figura 22

Evaluación del diámetro de tallo

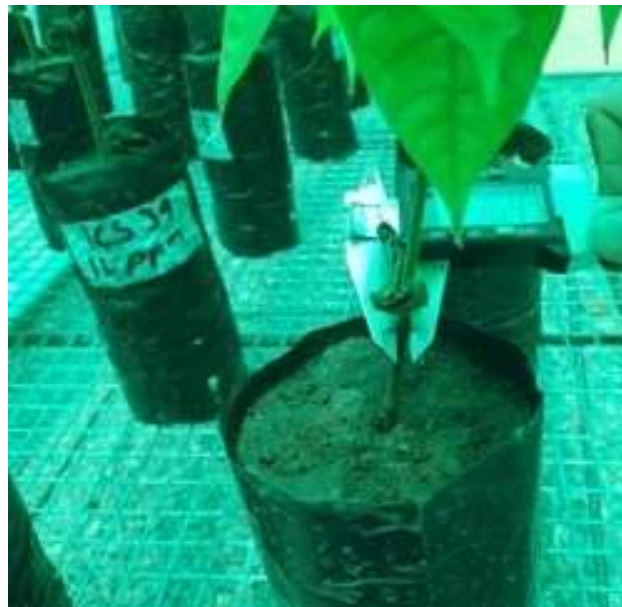


Figura 23

Medición del contenido de clorofila.



Figura 24

Riego de las unidades experimentales



Figura 25

Plántulas con 60 días DDT.



Figura 26

Extracción de tallos, hojas y raíces para análisis de laboratorio.



Figura 27

Digestión nítrico-perclórica de tallos, hojas y raíces.

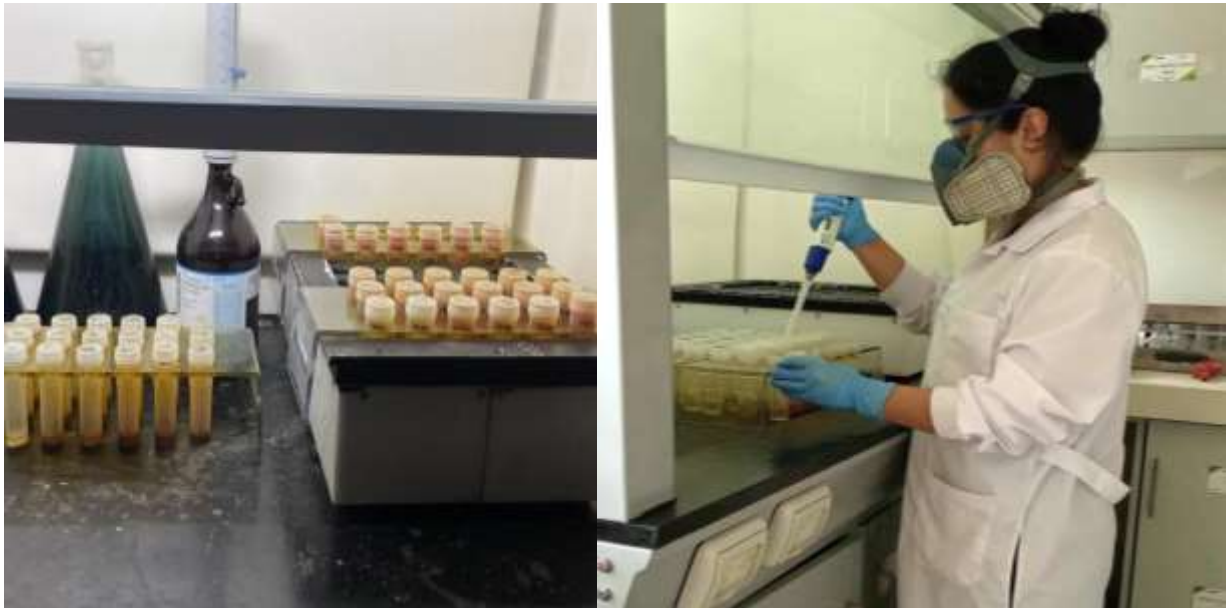
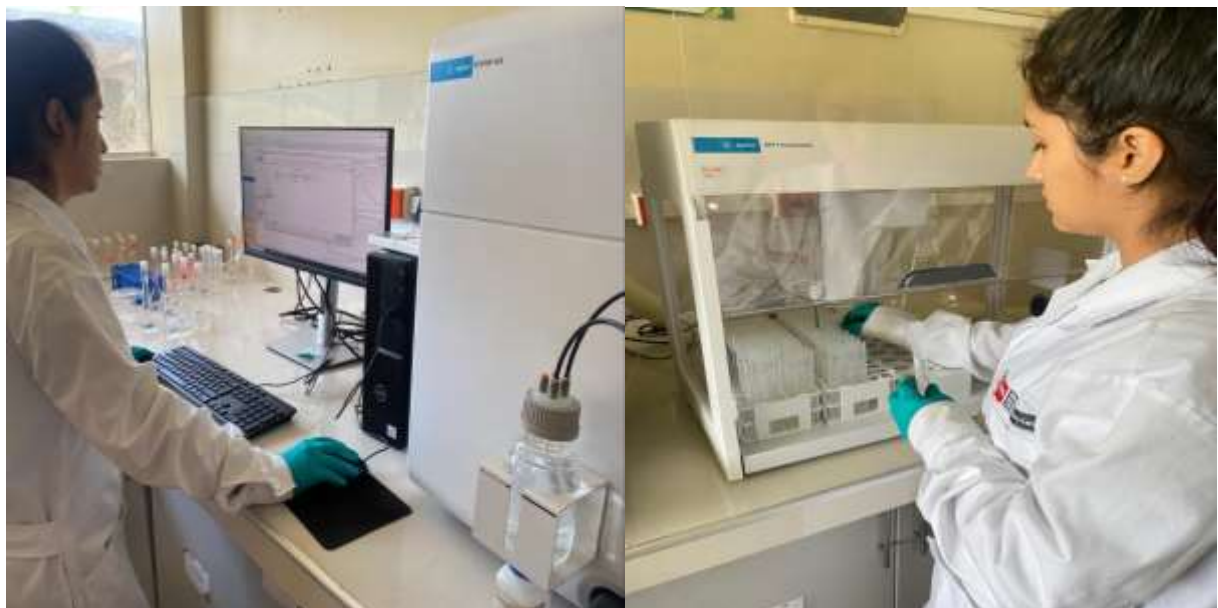


Figura 28

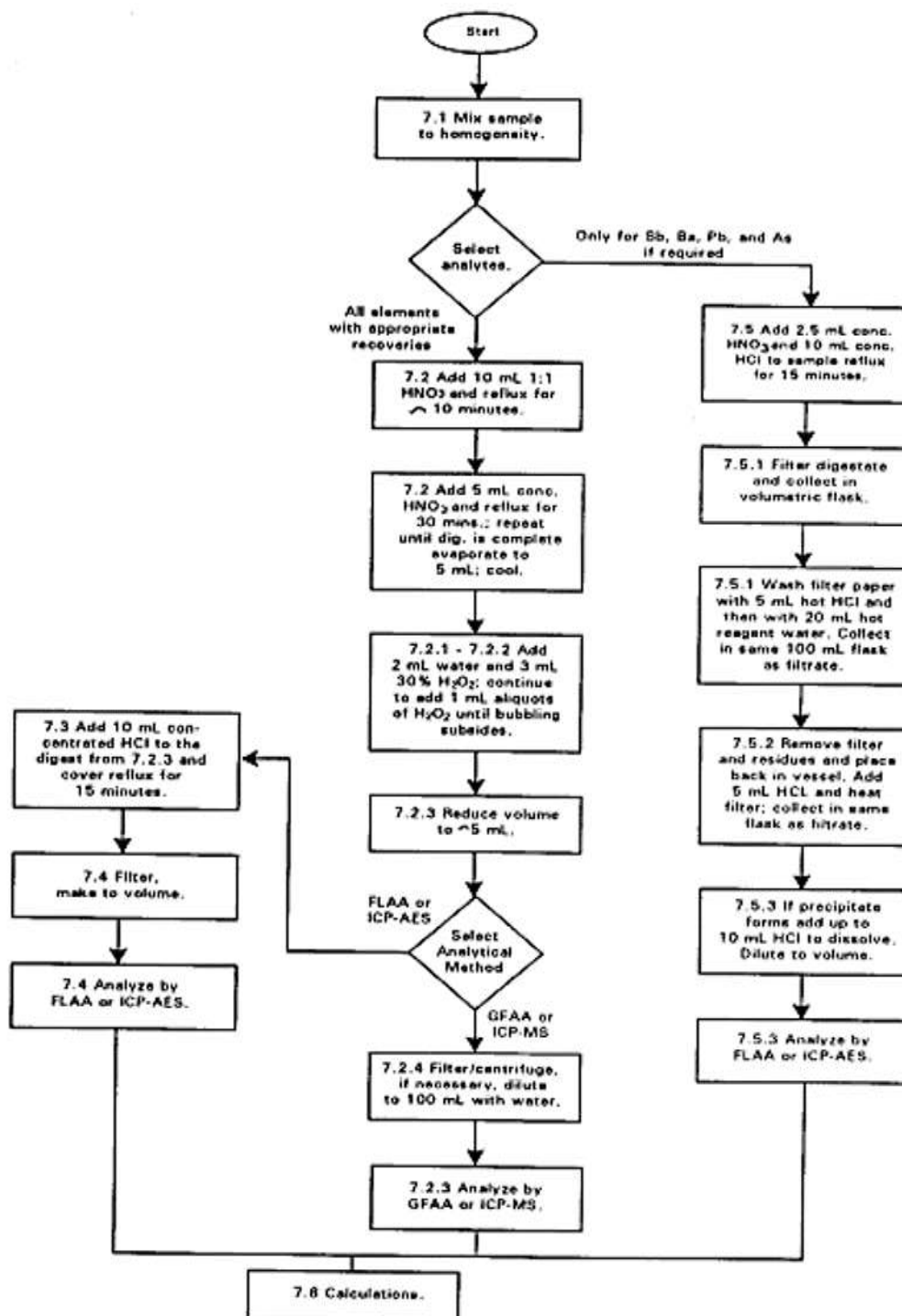
Determinación de contenido de cadmio en tallos, hojas y raíces mediante espectrofotometría de emisión atómica.



Anexo 2: Documentos de referencia para el análisis espectrofotométrico

Figura 29

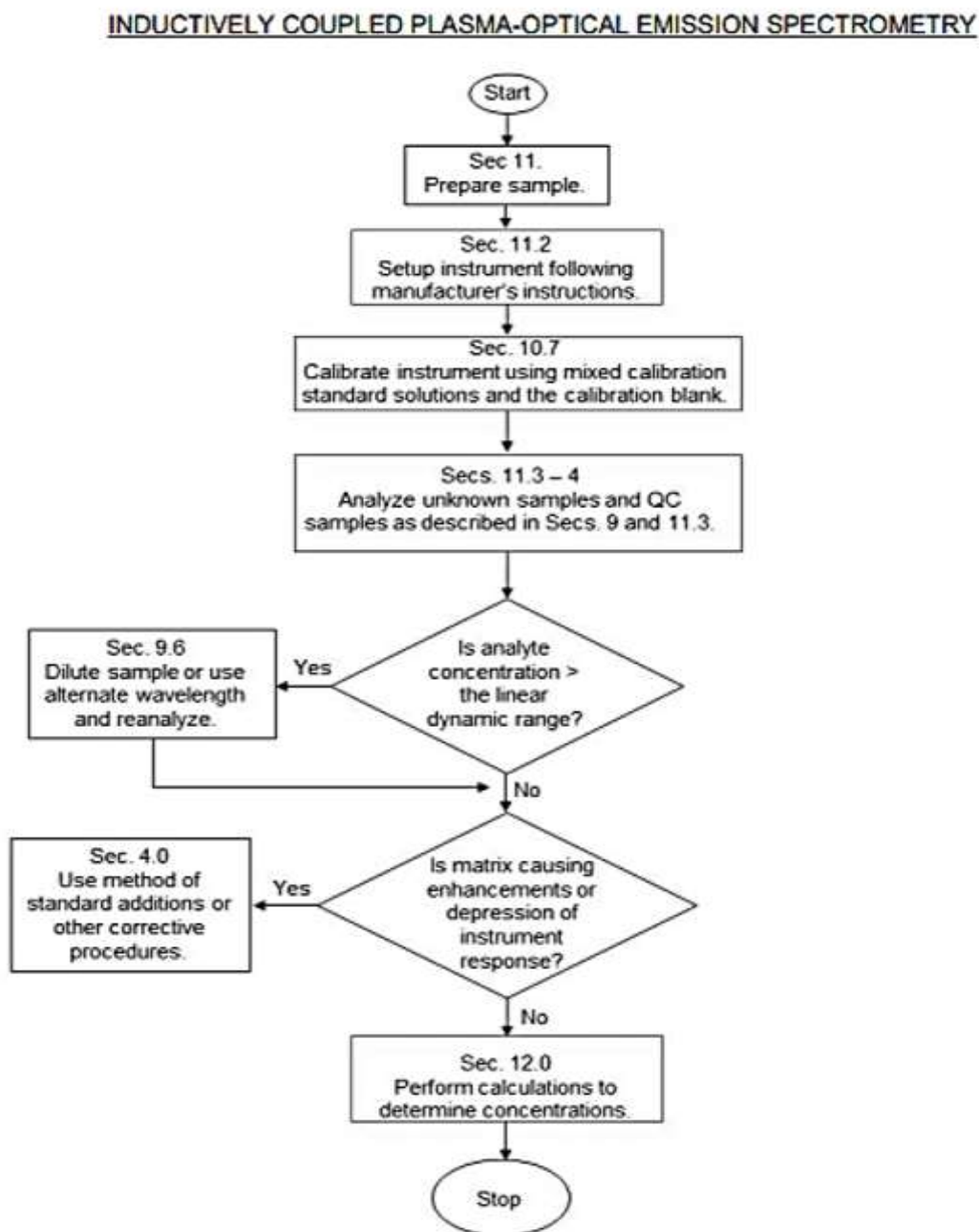
Method 3050B acid digestion of sediments, sludges, and soils.



Fuente: U.S. Environmental Protection Agency (1996).

Figura 30

Method 6010D inductively coupled plasma—optical emission spectrometry



Fuente: *U.S. Environmental Protection Agency (2015).*