

UNIVERSIDAD NACIONAL DE TUMBES

FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS

PROGRAMA ACADÉMICO DE AGRONOMÍA



Respuesta del crecimiento en el banano (*Musa sapientum* L.) a dos concentraciones de cadmio

Tesis:

Para optar el título de ingeniero agrónomo

Autor:

Bach. Elio Paolo Cruz Quispe

Tumbes, 2025

UNIVERSIDAD NACIONAL DE TUMBES

FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS

PROGRAMA ACADÉMICO DE AGRONOMÍA



Respuesta en el crecimiento del banano (*Musa sapientum* L.) a dos concentraciones de cadmio

Los firmantes declaramos que el informe de tesis es original tanto en su contenido como en su forma:

Bach. Elio Paolo Cruz Quispe

Autor

Dr. Ramón García Seminario

Asesor

Tumbes, 2025

UNIVERSIDAD NACIONAL DE TUMBES

FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS

PROGRAMA ACADÉMICO DE AGRONOMÍA



Respuesta del crecimiento en el banano (*Musa sapientum* L.) a dos concentraciones de cadmio

Informe de Tesis aprobada en forma y estilo por:

Dr. Jalmer Fidel Campaña Olaya

Presidente

Dr. Ramón García Seminario

Vocal

Tumbes, 2025



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE TUMBES
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
EX FUNDO FISCAL LA CRUZ-CAMPUS UNIVERSITARIO
SECRETARIA ACADÉMICA**



ANEXO VIII

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

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PRESENCIAL

En Tumbes, a los catorce días del mes de noviembre de dos mil veinticinco, siendo lasnueve..... horas, concinco..... minutos de lamañana....., de forma presencial, se reunieron en la sede de la Facultad de Ciencias Agrarias, el Jurado Calificador, designado por Resolución N° 060-2025/UNTUMBES-VRACAD-FCA-D, **Dr. Jalmer Fidel Campaña Olaya** (Presidente), **Mg. Samuel Edmundo Pacheco Marchan** (Secretario), **Dr. Ramón García Seminario** (Vocal), reconociendo en la misma resolución además, al **Dr. Ramón García Seminario**, como **Asesor**, ante la ausencia del **Mg. Samuel Edmundo Pacheco Marchan**, se procedió a evaluar, calificar y deliberar la sustentación de la tesis, **"Respuesta del crecimiento en el banano (*Musa sapientum* L.) a dos concentraciones de cadmio"**, para optar el Título Profesional de Ingeniero Agrónomo presentado por el **Bach. Elio Paolo Cruz Quispe**, Concluida la sustentación y absueltas las preguntas, por parte del sustentante y después de la deliberación, el jurado según el artículo N° 75 del Reglamento de Tesis para Pregrado y Posgrado de la Universidad Nacional de Tumbes, declara al: **Bach. ELIO PAOLO CRUZ QUISPE,....Aprobado....**, porUnanimidad....., con el calificativo ...**Muy bueno**....

Se hace conocer al sustentante, que deberá levantar las observaciones finales hechas al informe final de tesis, que el jurado le indica.

En consecuencia, quedaApto..... para continuar con los trámites correspondientes a la obtención del Título Profesional de Ingeniero Agrónomo, de conformidad con lo estipulado en la Ley Universitaria N° 30220, el Estatuto, Reglamento General, Reglamento General de Grados y Títulos y Reglamento de Tesis de la Universidad Nacional de Tumbes.

Siendo lasdiez.... horas ytreinta y cinco.... minutos del mismo día, se dio por concluida la ceremonia académica, procediendo a firmar el acta en presencia del público asistente.

Tumbes,14 de noviembre de 2025.....

	Ausente
Dr. Jalmer Fidel Campaña Olaya DNI N° 00236469 CODIGO ORCID: 0000-0002-0804-1208 Presidente	Mg. Samuel Edmundo Pacheco Marchan DNI N° CODIGO ORCID Secretario
Dr. Ramón García Seminario DNI N° 03683231 CODIGO ORCID: 0000-0003-0756-0935 Vocal	

C.C. - JURADOS (03) -ASESOR Y(CO)-INTERESADO-ARCHIVO (Decanato)
S.acad.

Elio Paolo Cruz Quispe

Informe Final de tesis Elio Cruz_2025.

 Tesis

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid::3117:519373494

Fecha de entrega

28 oct 2025, 10:37 GMT-5

Fecha de descarga

28 oct 2025, 10:40 GMT-5

Nombre del archivo

Informe Final de tesis Elio

Cruz_2025

Tamaño del archivo

1.6 MB

70 páginas

12512 palabras

48.339 caracteres



Dr. Ramon Garcia Seminario

CODIGO ORCID: 0000-0003-0756-0935

5% Similitud general

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

Filtrado desde el informe

▸ Bibliografía ▸

Texto citado

▸ Coincidencias menores (menos de 15 palabras)

Fuentes principales

4%  Fuentes de Internet

0%  Publicaciones

2%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

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

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



Dr. Ramón García Seminario

Código ORCID: 0000-0003-0756-0935

Fuentes principales

4%	 Fuentes de Internet
0%	 Publicaciones
2%	 Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Fuentes principales

Las fuentes con el mayor número de coincidencias dentro de la entrega. Las fuentes superpuestas no se mostrarán.

1	Internet		
repositorio.untumbes.edu.pe			3%
2	Trabajos del estudiante		
Universidad Nacional de Tumbes on 2019-10-15			1%
3	Internet		
repositorio.uchile.cl			<1%
4	Trabajos del estudiante		
Universidad Nacional de Tumbes on 2025-09-12			<1%
5	Trabajos del estudiante		
Universidad de Guayaquil on 2025-07-24			<1%
6	Internet		
seneca-books.hu			<1%



Dr. Ramón García Seminario
Código ORCID: 0000-0003-0756-0935

**Respuesta del crecimiento en el banano (*Musa sapientum* L.) a
dos concentraciones de cadmio**

Bach. Elio Paolo Cruz Quispe



Dr. Ramón García Seminario
Código ORCID: 0000-0003-0756-0935

CERTIFICACIÓN

Dr. Ramón García Seminario, docente adscrito al Departamento Académico de Agronomía de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Tumbes,

CERTIFICA:

Que, la Tesis: **Respuesta en el crecimiento del banano (*Musa sapientum* L.) a dos concentraciones de cadmio**, presentado por el alumno Elio Paolo Cruz Quispe, de la Escuela profesional de Agronomía, ha sido asesorada y evaluada por mí persona, por lo que puede presentarse e inscribirse en la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Tumbes para su revisión y aprobación.



Dr. Ramón García Seminario

DNI: 03683231

Código ORCID: 0000-0003-0756-0935

Asesor del proyecto de tesis

DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD

Yo, Elio Paolo Cruz Quispe, declaro que, el presente trabajo de investigación, titulado” **Respuesta en el crecimiento del banano (*Musa sapientum* L.) a dos concentraciones de cadmio**”, es original y ha sido presentado con el fin de obtener el título de Ingeniero Agrónomo. En tal sentido, confirmo que, los resultados que se han reportado no han sido copiados de otros archivos o investigaciones. Por ello, la información que no me pertenece, usada para complementar y discutir la tesis, está citada y referenciada debidamente por derechos del autor, siendo así, este trabajo, producto del esfuerzo de mi persona y asesor, en cuanto a su ejecución y redacción para su aprobación.



Bach. Elio Paolo Cruz Quispe
DNI N.° 72684777

DEDICATORIA

A Dios, por concederme el don de la vida y bendecirme con una familia maravillosa. Le agradezco profundamente por otorgarme la inteligencia, la fortaleza, las habilidades y la perseverancia necesarias para superar cada desafío que se presenta en mi camino. Con humildad y desde lo más sincero de mi corazón, dedico a Él cada logro y cada paso alcanzado.

Con todo mi amor, cariño y gratitud, dedico este trabajo especialmente a mi madre **Rosa Mercedes Quispe**, quien me dio la vida y ha estado a mi lado en los momentos más felices y también en los más difíciles.

Gracias por tu amor incondicional, por todas las muestras de afecto y cariño, te estaré agradecido toda la vida.

También a mi padre **Elio Cruz Mogollón**, por su ejemplo de trabajo, responsabilidad y perseverancia, valores que me han guiado a lo largo de mi vida. Gracias por tus consejos, tu apoyo constante y por enseñarme que con esfuerzo y dedicación todo objetivo puede alcanzarse.

Extiendo esta dedicatoria con todo mi cariño a mis queridas hermanas, **Kattia Roswita Cruz Quispe y Sally Priscila Cruz Quispe**, quienes con su amor, comprensión y alegría han sido un pilar fundamental en mi vida. Su compañía y confianza me motivaron a seguir adelante incluso en los momentos más difíciles.

A todos ustedes, mi familia, les debo gran parte de este logro. Este trabajo es también suyo, fruto del amor, la unión y los valores que me inculcaron desde siempre.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, deseo expresar mi gratitud a Dios, por concederme sabiduría, fortaleza y la oportunidad de hacer realidad este sueño tan anhelado. Gracias por guiarme en cada paso y permitirme culminar con éxito esta etapa de mi vida.

Mi profundo agradecimiento al **Dr. Ramón García Seminario**, por su visión crítica, su rectitud profesional y su invaluable apoyo durante mi formación. Sus consejos, conocimientos, experiencia y paciencia fueron fundamentales para mi desarrollo personal y académico, impulsándome a crecer como persona e investigador.

A mi madre, mi padre y mis hermanas, por su amor incondicional, su apoyo constante y por enseñarme que la perseverancia y el esfuerzo son las claves para alcanzar cualquier meta. Gracias por ser mi fuente de inspiración y fortaleza en cada momento de este camino.

Extiendo también mi más sincero reconocimiento a todos los **docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Agronómica**, quienes, con su compromiso, exigencia y ejemplo, contribuyeron de manera significativa a mi formación integral. Cada enseñanza impartida ha sido una guía valiosa en mi crecimiento académico y personal.

A mis compañeros y amigos, por compartir conmigo experiencias, aprendizajes y desafíos, haciendo de esta travesía universitaria una etapa llena de recuerdos y enseñanzas inolvidables.

Finalmente, a todas las personas que, directa o indirectamente, aportaron a la culminación de este trabajo, les expreso mi más profundo y sincero agradecimiento.

ÍNDICE GENERAL

	Página.
Certificación.....	IV
Declaración de originalidad.....	V
Dedicatoria.....	VI
Agradecimiento.....	VII
RESUMEN.....	12
ABSTRACT.....	13
CAPITULO I.....	14
Introducción.....	14
CAPITULO II.....	16
Revisión de Literatura.....	16
2.1.1. Características generales del banano.....	16
2.1.2. Metales pesados.....	17
2.1.3. Características del cadmio (Cd). Toxicidad e influencia en la cadena alimentaria.....	17
2.1.4. Antecedentes experimentales.....	19
CAPITULO III.....	22
Materiales y Métodos.....	22
3.1. Lugar de ejecución.....	22
3.2. Métodos.....	22
3.2.1. Tipo de investigación.....	22
3.3.2. Factor y Tratamientos en estudio.....	23
3.3.3. Diseño experimental.....	24
3.3.4. Población, muestra y muestreo.....	24
3.3.5. Procesamiento y análisis estadístico.....	24
3.3.6. Conducción del experimento.....	24
3.3.7. Variables evaluadas.....	26
CAPITULO IV.....	28
Resultados.....	28
4.1. Altura de la parte aérea de la planta.....	28
4.2. Diámetro del pseudotallo.....	30
4.3. Diámetro del rizoma.....	31
4.4. Biomasa fresca de hojas.....	33
4.5. Biomasa seca de hojas.....	35
4.6. Biomasa fresca de raíces.....	37

4.7. Biomasa seca de las raíces.....	38
4.8. Relación entre variables Morfológicas y el contenido de Cd en los órganos vegetativos y suelo.....	40
4.9. Mapa de calor (Heatmap) del contenido de elementos minerales en los órganos vegetativos y suelo.....	41
CAPITULO V.....	46
Discusión.....	46
CAPITULO VI.....	48
Conclusiones.....	48
CAPITULO VI.....	49
Recomendaciones.....	49
CAPITULO VIII.....	50
Referencias bibliográficas.....	50
ANEXOS.....	54

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Matriz de operacionalización de variables.....	23
Tabla 2. Factores y tratamiento del ensayo experimental.....	24
Tabla 3. Anova para la altura de parte aérea de las plantas expuestas a dos concentraciones de Cd.....	28
Tabla 4. Prueba estadística de Tukey (5%) para la altura de parte aérea de las plantas expuestas a dos concentraciones.	29
Tabla 5. ANOVA para el diámetro del pseudotallo de las plantas expuestas a dos concentraciones de Cd.	30
Tabla 6. Prueba estadística de Tukey (5%) para el diámetro del pseudotallo de las plantas expuestas a dos concentraciones de Cd.....	31
Tabla 7. ANOVA para el diámetro del rizoma de las plantas expuestas a dos concentraciones de Cd.....	32
Tabla 8. Prueba estadística de Tukey (5%) para el diámetro del rizoma de las plantas expuestas a dos concentraciones de Cd.....	32
Tabla 9. ANOVA para la biomasa fresca de hojas de plantas de banano expuestas a dos concentraciones de Cd).....	34
Tabla 10. Prueba estadística de Tukey (5%) para la biomasa fresca de hojas de plantas de banano expuestas a dos concentraciones de Cd.....	34
Tabla 11. ANOVA para la biomasa seca de hojas de plantas de banano expuestas a dos concentraciones de Cd.....	35
Tabla 12. Prueba estadística de Tukey (5 %) para la biomasa seca de hojas de plantas de banano expuestas a dos concentraciones de Cd.....	36
Tabla 13. ANOVA para la biomasa fresca de las raíces de plantas de banano expuestas a dos concentraciones de Cd	37
Tabla 14. Prueba estadística de Tukey (5 %) para la biomasa fresca de las raíces	37
Tabla 15. ANOVA para la biomasa seca de las raíces de plantas de banano expuestas a dos concentraciones de Cd.....	38
Tabla 16. Prueba estadística de Tukey (5 %) para la biomasa seca de las raíces de plantas de banano expuestas a dos concentraciones de Cd.....	39

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localización satelital del Taller de Enseñanza e Investigación de Cultivos Hidropónicos	22
Figura 2. Efecto de dos concentraciones de Cd sobre la altura de parte aérea de la planta de banano (<i>Musa sapientum</i> L.).....	29
Figura 3. Efecto de dos concentraciones de Cd sobre el diámetro del pseudotallo de la planta de banano (<i>Musa sapientum</i> L.)	31
Figura 4. Efecto de dos concentraciones de Cd sobre el diámetro del rizoma de la planta de banano (<i>Musa sapientum</i> L.).....	33
Figura 5. Efecto de dos concentraciones de Cd sobre la biomasa fresca de las hojas de la planta de banano (<i>Musa sapientum</i> L.).....	35
Figura 6. Efecto de dos concentraciones de Cd sobre la biomasa seca de las hojas de la planta de banano (<i>Musa sapientum</i> L.)	36
Figura 7. Efecto de dos concentraciones de Cd sobre la biomasa fresca de las raíces de la planta de banano (<i>Musa sapientum</i> L.)	38
Figura 8. Efecto de dos concentraciones de Cd sobre la biomasa seca de las raíces de la planta de banano (<i>Musa sapientum</i> L.).....	39
Figura 9. Correlación múltiple de Pearson entre variables Morfológicas y el contenido de Cd en tejido vegetal de plantas de banano (<i>Musa sapientum</i> L.)	41
Figura 10. Mapa de calor de los elementos químicos y su distribución en los órganos vegetativos de la planta de banano (<i>Musa sapientum</i> L.)	45

RESUMEN

El banano (*Musa sapientum* L.), es una planta herbácea, considerada uno de los pilares fundamentales en la economía del Perú, cuya producción está destinada básicamente a la exportación. Uno de los problemas que preocupa a los agricultores bananeros en la presencia de contaminantes químicos en la fruta, por lo que, en esta investigación se evaluó el efecto de dos concentraciones de Cd (5 y 10 ppm) en el crecimiento de las plantas de banano en un Diseño de Bloques Completamente aleatorizados con tres repeticiones. Como fuente del elemento Cd se utilizó acetato de cadmio dihidratado ($\text{CH}_3\text{COO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) quelatizado con ácido Etilen diamino Tetracético (EDTA) e incorporado a la solución nutritiva mineral. Los resultados mostraron un efecto negativo sobre el crecimiento, principalmente en el pseudotallo, y rizoma, los cuales actúan como principales sumideros, al almacenan la mayor parte del Cd y metales pesados asociados (Cd, Cr, Sb, Cu, As, Ba) limitando su transporte hacia el pseudotallo y hojas; mientras que, algunos parámetros, como la altura de la parte aérea de la planta, biomasa fresca y seca de hojas presentaron una menor sensibilidad al elemento Cd. En las hojas y pseudotallo existe una correlación entre la translocación de Cd y los metales pesados con un almacenamiento de elementos nutritivos (Ca, Na, K, Mo, Mn, Mg), sugiriendo posibles efectos antagonistas o desplazamiento iónico.

Palabras clave: Toxicidad de Cd, metal pesado, crecimiento, hidroponía

ABSTRACT

Banana (*Musa sapientum* L.) is a herbaceous plant considered one of the fundamental pillars of the Peruvian economy, whose production is primarily intended for export. One of the problems that concerns banana farmers is the presence of chemical contaminants in the fruit. Therefore, in this study, the effect of two concentrations of Cd (5 and 10 ppm) on the growth of banana plants was evaluated in a completely randomized block design with three replications. Cadmium acetate dihydrate ($\text{CH}_3\text{COO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), chelated with ethylene diamine tetraacetic acid (EDTA) and incorporated into the mineral nutrient solution, was used as the source of Cd. The results showed a negative effect on growth, mainly in the pseudostem and rhizome, which act as the main sinks, storing most of the Cd and associated heavy metals (Cd, Cr, Sb, Cu, As, Ba), limiting their transport to the pseudostem and leaves. Meanwhile, some parameters, such as the height of the aerial part of the plant and the fresh and dry biomass of leaves, showed lower sensitivity to the element Cd. In the leaves and pseudostem, there is a correlation between the translocation of Cd and heavy metals and the storage of nutrient elements (Ca, Na, K, Mo, Mn, Mg), suggesting possible antagonistic effects or ionic displacement.

Keywords: Cd toxicity, heavy metal, growth, hydroponics

CAPITULO I

INTRODUCCION

El banano (*Musa sapientum* L.), es una planta hortícola, que destaca por su relevancia en el Perú, no solo por su rentabilidad como fruta de exportación, que constituye el 90 % de la producción nacional, sino también, por ser un pilar fundamental en la economía familiar de los productores (FAO, 2017). En la región de Tumbes, el banano ocupa el segundo lugar en importancia después del arroz, con un área total de 4 013 hectáreas, divididas en 2 993 hectáreas de banano convencional, seguido por el banano orgánico con 1 056 hectáreas (MINAGRI, 2023), cuya producción está destinada principalmente a mercados europeos.

Precisamente, la exigencia por fruta de calidad por parte de los países hace que nuestros agricultores bananeros realicen prácticas agronómicas adecuadas para cumplir con los estándares solicitados, sobre todo en lo que respecta a los insumos químicos que están restringidos en la producción orgánica. Actualmente, uno de los problemas que está preocupando a los productores bananeros de las Regiones de Tumbes y Piura, es la presencia del elemento cadmio (Cd) detectado en la fruta de exportación por La Unión Europea, la cual en sus normas de seguridad alimentaria ha establecido un valor de 0,50 ppm (mg/kg del producto) como umbral máximo permitido (Perrier et al., 2011). Las fuentes de contaminación de este elemento detectadas en Tumbes son: los fertilizantes, pesticidas y el riego con agua del río Tumbes contaminado por los relaves mineros de la República del Ecuador.

El cadmio pertenece al grupo de los metales pesados, y al ser absorbido por las plantas en cantidades altas podría interferir en los procesos fisiológicos, afectando el crecimiento y desarrollo de las

mismas y en consecuencia su consumo resulta ser altamente tóxico, afectando la cadena trófica dentro de los ecosistemas (Londoño, Londoño & Muñoz, 2016).

Estudios realizados muestran efectos negativos del Cd en el crecimiento de plantas como cacao (Villalaz-Perez, 2024, Mendoza-López et al., 2021, Furcal-Beriguete & Torres Morales, 2020, Aguirre et al, 2020 Alvarez et al., 2021), caña de azúcar (Ortiz et al., 2022), mango (Alarcon et al., 2024) y banano (Elazab et al., 2023, Liu et al., 2020).

Sin embargo, las investigaciones realizadas se han enfocado en estudios a nivel *in vitro* o en casos de contaminación accidental, sin explorar adecuadamente los umbrales de toxicidad ni el comportamiento agronómico del cultivo, bajo distintos niveles del metal. Dado que el banano es una planta herbácea, perenne, con alta demanda hídrica y nutricional, su sensibilidad a contaminantes como el cadmio podría variar significativamente, dependiendo de factores como la edad de la planta, variedad cultivada, tipo de suelo, condiciones climáticas y nivel de exposición del metal. Por ello, estudiar su respuesta a tres concentraciones específicas de cadmio representa una valiosa contribución para comprender sus mecanismos de tolerancia o vulnerabilidad, así como para diseñar estrategias de manejo sostenible en suelos con riesgo de contaminación.

CAPITULO II

REVISION DE LITERATURA

2.1.1. Características generales del Banano

El banano es una planta de huerto, que se cultiva en muchos países del mundo, sobre todo en los trópicos. Su fruta es muy apreciada por su riqueza nutritiva, textura y sabor, constituyéndola en una de las más solicitadas en la dieta familiar. En el Perú, se cultiva banano convencional y orgánico, este último con fines de exportación, representando el 3 % de la producción mundial, cuya superficie sembrada se ha incrementado en los últimos cinco años, llegando a cultivarse aproximadamente 15 000 has, principalmente en el norte del país (Tumbes, Piura, Lambayeque y La Libertad (MIDAGRI, 2019).

En el proceso de producción del banano, surgen diversos inconvenientes que pueden impactar, tanto los niveles de rendimiento como la calidad del fruto. Entre estos factores encontramos, el volcado de plantas en producción, lesiones por traslado de la fruta desde el campo a la empacadora, defectos estéticos ocasionados por insectos plagas y patógenos, entre otros. Actualmente, evaluaciones realizadas han arrojado datos preocupantes sobre cantidades de contaminantes químicos presentes en las frutas del banano, especialmente el elemento cadmio que supera los límites permisibles para este tipo de alimentos (MINAGRI, 2016).

Desde el punto de vista agronómico, el banano es exigente en agua, luz, y nutrientes. Requiere suelos profundos, bien drenados, con alto contenido de materia orgánica y un pH ligeramente ácido (entre 5,5 y 7,0). El cultivo es muy sensible a condiciones de estrés ambiental, tales como sequía, salinidad o contaminación por metales pesados (Robinson & Galán Saúco, 2010).

2.1.2. Metales Pesados

Los metales pesados son elementos químicos, llamados así por su alta densidad y su importancia radica en la capacidad de bioacumulación y toxicidad para los seres vivos. Entre estos metales se encuentran, el mercurio, cadmio, plomo, arsénico, níquel, cobre y cromo (Lin, et al., 2023, Garcia - Rodríguez et al., 2014, Santos et al., 2012).

La producción intensiva de la agricultura tradicional promueve el uso de fitosanitarios, fertilizantes sintéticos y hormonas de crecimiento, con el objeto de incrementar los rendimientos. Sin embargo, la mayoría de estos compuestos químicos poseen en su composición trazas de metales pesados que afectan los agroecosistemas y la degradación de la biodiversidad (Tonolli et al., 2019).

2.1.3. Características del cadmio (Cd). Toxicidad e Influencia en la cadena alimentaria.

El cadmio está presente de forma natural en la corteza terrestre y forma parte de los suelos, las rocas, el carbón, fertilizantes minerales y plaguicidas. Se le considera un metal altamente tóxico que podría ocasionar daños en los ecosistemas, la salud de los seres humanos, animales y plantas, incluso, a concentraciones muy bajas. La exposición de altos niveles de cadmio a largo plazo puede resultar en serios problemas para la salud de las personas, desde problemas cardiovasculares, renales, neurológicos hasta diabetes y cáncer (Li et al., 2023, Reyes et al., 2016).

En condiciones normales, el Cd está presente en el suelo en bajas concentraciones (0,01 y 0,7 mg/kg), pero en suelos contaminados puede superar los 3–5 mg/kg, generando efectos adversos sobre la flora, fauna y salud humana. Este metal puede ser absorbido por las raíces y translocado hacia los tejidos aéreos, acumulándose en hojas, pseudotallo e incluso en los frutos. Su toxicidad depende de varios factores, incluyendo la concentración del metal, el pH del suelo,

textura, presencia de materia orgánica y la capacidad de la planta para inmovilizarlo o excluirlo (Alloway, 2013).

El cadmio presenta alta movilidad en el suelo, especialmente en ambientes con pH inferior a 6,5. A diferencia de otros metales como el plomo o el zinc, que tienden a fijarse fuertemente en los coloides del suelo, el Cd puede permanecer en la solución del suelo y ser absorbido fácilmente por las raíces de las plantas, para luego transportarse a través del sistema vascular hasta las partes aéreas de las plantas, acumulándose preferentemente en los órganos vegetativos (raíces, tallos y hojas) e incluso en órganos reproductivos (flores, frutas, semillas), lo que implica riesgos, tanto, fitotóxicos como alimentarios (Clemens et al., 2013).

El banano es uno de los muchos productos agrícolas regulados por el Reglamento 488/2014, que actualiza el Reglamento 1881/2006 del Comité Científico y Técnico de Sustancias de la Cadena Alimentaria (CONTAM) del Sistema Alimentario Europeo. La exposición dietética promedio al Cd en los países europeos está cerca o ligeramente por encima del límite semanal de 2,5 g/kg de peso (CAC, 2016; Diario Oficial de la Unión Europea, 2014). Este reglamento comenzó a aplicarse en enero de 2019 y establece un control más riguroso sobre la importación de estos alimentos.

El cadmio, junto al plomo son los elementos más relevantes en cuanto a la contaminación del suelo, especialmente en zonas industriales, donde las concentraciones pueden volverse considerablemente elevadas, generando diversos efectos en las interacciones alimentarias a lo largo de la cadena trófica (Londoño-Franco et al., 2016, Sánchez-Barrón, 2016).

A nivel bioquímico, el cadmio interfiere en la absorción de elementos esenciales importantes en la planta, como Zn, Cu, Ca y Fe (Reyes, 2020). El transporte de este elemento a través de la cadena alimentaria

se incrementará progresivamente a medida que exista mayor concentración de este elemento que puede verse influenciado por factores climáticos y condiciones edáficas. Es crucial comprender esta dinámica para implementar estrategias efectivas de gestión ambiental y reducir los riesgos asociados con la acumulación de cadmio en los sistemas ecológicos y de producción de alimentos (Khan et al., 2022).

2.1.4. Antecedentes experimentales

Aunque se ha investigado ampliamente la toxicidad del Cd en cultivos como arroz, trigo y lechuga, su impacto específico en cultivos tropicales como el banano (*Musa sapientum* L.) ha sido menos estudiado.

Los resultados reportados en la Región Brunca-Costa Rica en el cultivo de cacao, indicaron que tres de un total de 19 muestras, mostraron una concentración de 1 mg/kg de biomasa. Las raíces y las hojas podrían acumular Cd y transferirlo a los granos de cacao, donde se registraron concentraciones que varían de 0 a 8,70 mg/kg (Velásquez-Vélez, 2022).

Los estudios realizados en el Perú muestran que la concentración de Cd excede el umbral 1,4 mg/kg, establecido en los Estándares de Calidad Ambiental de suelos agrícolas (Ministerio del Ambiente, 2017), lo que afecta la calidad de diversos productos agrícolas entre ellos el banano orgánico de exportación.

Soto, et al. (2015). en un estudio realizado en suelos de una zona minera de Pastora, Región de Madre de Dios, reporta una concentración de cadmio inferior a 0,005 mg/kg, catalogada por debajo de los límites permisibles, de acuerdo a lo establecido por Codex alimentario.

Una investigación realizada en las cooperativas ASPRAOSRA y ASPROBO en la Región de Piura, mostró concentraciones de cadmio en frutos de banano $< 0,028$ mg/kg en ambas cooperativas; mientras que en suelos donde se cultivaba esta planta se encontró $0,4822$ mg/kg en ASPRAOSRA y $0,4181$ mg/kg en ASPROBO (Alvarado, 2021).

El Congreso Ecuatoriano de Ciencias del Suelo, realizó un análisis en fincas de banano y plátano en las principales regiones agrícolas de Ecuador, los resultados mostraron niveles promedios de cadmio de $0,17$ a $0,31$ mg/kg, indicando su presencia y distribución en casi todas las regiones del país (Carrillo & Durango, 2010). Otro estudio realizado en Guayaquil-Ecuador reporta que, la presencia de Cd en hojas, raíces y frutos del banano puede alcanzar un promedio de $0,95$ mg/kg, este valor supera los límites máximos permitidos según la normativa ecuatoriana (Quinde, 2018).

Elazab et al. (2023) en condiciones in vitro, obtuvieron una reducción significativa en la formación de brotes, la elongación del tallo y la cantidad de clorofila en *Musa acuminata*, mientras que aumentó el estrés oxidativo celular. Esto sugiere que, la planta activa mecanismos de defensa ante la presencia de Cd en sus tejidos, pero a costa de su crecimiento vegetativo.

Liu et al. (2020) también encontraron que, el Cd provoca cambios en la estructura foliar y una reducción en la tasa fotosintética, disminuyendo la eficiencia energética de la planta de banano. Además, observaron daños en el ADN, lo que indica que el estrés por Cd puede tener efectos a largo plazo sobre la estabilidad genética de la especie

Otro estudio, realizado por Flores et al. (2018) a nivel de campo reportaron acumulaciones significativas de Cd en raíces y hojas de banano cultivado en suelos cercanos a fuentes industriales. Estas

plantas mostraron una reducción en el desarrollo radicular y en la producción de biomasa, además, de una mayor susceptibilidad a plagas y enfermedades.

Liu et al. (2020) evaluaron los efectos combinados del Cd y el déficit hídrico sobre *Musa spp.* en cultivo in vitro. Se usaron concentraciones de Cd de 50 y 100 μM , tanto, en condiciones de hidratación normal como en estrés hídrico inducido con polietilenglicol (PEG-6000). Las variables evaluadas incluyeron biomasa, longitud de raíces, área foliar, clorofila, contenido de agua relativa y estabilidad del ADN (usando RAPD-PCR). Los hallazgos revelaron que el Cd afecta drásticamente la morfología foliar y radicular, además de generar alteraciones genéticas detectables a nivel molecular. La combinación de Cd y sequía amplificó los efectos negativos, lo que sugiere que el banano tiene una baja capacidad de respuesta adaptativa cuando enfrenta múltiples factores estresantes.

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Lugar de ejecución

El ensayo experimental se ejecutó en el Taller de Enseñanza e Investigación de Cultivos Hidropónicos (TEICH) de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Tumbes, ubicado 4 a km del distrito de San Pedro de los Incas (Corrales), Provincia y Región de Tumbes, en las coordenadas UTM 9603026.53 mS, 555 137. 77 mE y una altitud de 5 m.s.n.m (Fig. 1).



Figura 1. Localización satelital del Taller de Enseñanza e Investigación de Cultivos Hidropónicos

3.2. METODOS

3.2.1. Tipo de investigación

La investigación fue de tipo básica, experimental y cuantitativa, puesto que se recolectaron datos de las variables evaluadas (Características Morfológicas), que fueron analizadas de manera sistemática y procesados estadísticamente, para establecer explicaciones científicas a los efectos causados por el elemento

Cd. Las variables estudiadas se detallan en la Matriz de operacionalización de variables (Tabla 1).

Tabla 1. Matriz de operacionalización de variables

Variable	Dimensiones	Indicador	Unidad de medida	Instrumento de medición
Independiente Concentraciones de cadmio	5 ppm 10 ppm 0 ppm	-----	ppm	Balanza
Dependiente Crecimiento de plantas de banano	Características morfológicas y concentración en planta	Altura de planta	cm	Cinta métrica
		Biomasa fresca de parte aérea	g	Balanza
		Biomasa seca de parte aérea	g	Balanza
		Biomasa fresca de raíz	g	Balanza
		Biomasa seca de raíz	g	Balanza
		Concentración en raíz, tallo y hojas.	ppm	Espectrofotómetro de radiación visible
Variables intervinientes	Factores ambientales	- Temperatura - Humedad relativa	°C %	Termohigroméetro

3.2.2. Factor y Tratamientos en estudio

El factor de estudio estuvo constituido por las concentraciones de Cd ensayadas. Los tratamientos se detallan en la tabla 2.

Tabla 2. Factor y tratamientos del ensayo experimental

Factor	Tratamiento	Clave
Concentraciones de Cd	5 ppm	T1
	10 ppm	T2
	0 ppm	T0

3.2.3. Diseño experimental

Se utilizó el Diseño de Bloques Completamente al Azar (DBCA) con tres tratamientos (incluyendo el testigo) y tres repeticiones. El área experimental se detalla en croquis correspondiente (anexo).

3.2.4. Población, muestra y muestreo

La población total estuvo conformada por todos los brotes (hijuelos) de banano utilizados en el ensayo experimental, de los cuales se tomaron 3 plantas al alzar y por repetición como muestras. La unidad experimental estuvo representada por una maceta de polietileno de 5 kg de capacidad, Cada repetición abarcó 6 macetas, haciendo un total de 18 unidades experimentales por tratamiento.

3.2.5. Procesamiento y análisis estadístico

Los datos se obtenidos a partir de las observaciones realizadas fueron tabulados y procesados con Microsoft Excel versión 6. El análisis de la varianza y el Test de significancia de Tukey al 5 % se realizaron con el software R y RStudio. Los resultados se presentan en tablas y figuras.

3.2.6. Conducción del experimento

a) Lavado y desinfección del sustrato

Como sustrato inerte se utilizó arena de río, la cual fue lavada 5 veces con agua potable para eliminar restos orgánicos y minerales que podrían estar presentes; posteriormente se realizó una desinfección con lejía (Hipoclorito de sodio) al 10 % de la solución comercial, seguida de 3 enjuagues con agua potable para eliminar restos de lejía.

b) Desinfección de macetas

Las macetas (unidades experimentales) se desinfectaron con lejía 10 % de la solución comercial, seguida con tres enjuagues de agua potable.

c) Siembra y riego del sustrato

Los hijuelos de banano de la variedad William, procedentes del vivero agrícola de Chulucanas, se plantaron unitariamente en las macetas conteniendo el sustrato lavado y desinfectado. Se realizaron riegos diarios del sustrato con agua destilada mediante un pulverizador hasta el prendimiento de los hijuelos. Posteriormente, se regaron con solución nutritiva mineral comercial de la Universidad Nacional Agraria La-Molina.

d) Preparación y aplicación de las soluciones de cadmio (Tratamientos)

Las concentraciones de cadmio se prepararon con acetato de cadmio dihidratado ($\text{CH}_3\text{COO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) quelatizado con ácido Etilen diamino Tetracético (EDTA), en las concentraciones ensayadas. La aplicación se realizó conjuntamente al momento de los riegos con la solución nutritiva mineral y por inmersión (platos ubicados en la base de la maceta que presentaba 4 orificios). Los riegos se realizaron dos veces por semana para mantener la concentración de los elementos minerales y el Cd. El testigo se regó solo con solución mineral (sin presencia de Cd). La ubicación y disposición de las macetas se realizó según el diseño

experimental propuesto manteniéndolas estratégicamente para garantizar una distribución uniforme de luz solar, temperatura y humedad.

e) Control de insectos plaga y enfermedades

Como parte de la observación exhaustiva, se llevaron a cabo muestreos permanentes para detectar la presencia de insectos y patógenos que pudieran afectar a las plantas. En el presente estudio solo se detectó la presencia de Mosca blanca (*Rupela albinella*), que no presento riesgo alguno.

3.2.7. Variables evaluadas

Las evaluaciones se realizarán a los 120 días de instalado el experimento, tomando 3 plantas al azar (cada repetición), se registraron las siguientes variables:

Altura de parte aérea

Las plantas se midieron con una cinta métrica, desde el cuello anatómico hasta el ápice de las mismas.

Biomasa fresca de parte aérea y raíz

Las plantas seleccionadas se seccionaron con un bisturí, desde el cuello anatómico, separando la parte aérea y radical. Posteriormente, se pesaron en una balanza digital para obtener la biomasa fresca de las plantas.

Biomasa seca de parte aérea y raíz

Para obtener la biomasa seca, las muestras evaluadas en el punto anterior fueron depositadas por separado en bolsas de papel kraft, y colocadas en una estufa de aire caliente forzado a 70 C° marca MEMMERT por 72 horas para su secado uniforme. Posteriormente, las muestras se pesaron en una balanza digital para obtener el peso seco.

Concentración de elementos minerales en raíces, tallo, pseudotallo y hojas.

Las muestras uniformes de raíces, tallo y hojas de plantas evaluadas fueron enviadas al Laboratorio de Pro suelos y aguas LABSAF del Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA – La Molina) para el análisis respectivo. Se realizaron relaciones (mapas de calor) y correlaciones (Correlación múltiple de Pearson) entre los elementos químicos y los órganos vegetativos evaluados.

Variables ambientales

Se realizaron mediciones frecuentes de los parámetros ambientales. como la temperatura (T°) y la humedad relativa (HR°), a fin de documentar y comprender mejor el entorno de crecimiento de las plantas de banano. Para ello, se utilizó un termo higrómetro modelo COOLBOX

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

4.1. Altura de parte aérea de la planta

En la figura 1 se muestran los resultados de la altura de parte aérea de las plantas de banano expuestas a dos concentraciones de Cd. Se observa que hay un ligero decrecimiento de las plantas expuestas a 5 y 10 ppm de Cd. El análisis de varianza (Tabla 3), sugiere que los efectos de las concentraciones de Cd podrían estar afectando el crecimiento de las plantas, aunque no se alcanza una significancia estadística estricta ($p = 0,0613$) al 95 % de confianza. El valor F observado para el efecto del tratamiento es 6,075, indicando que existe cierta variabilidad explicada por los niveles de cadmio aplicados. Para el caso de los bloques presentaron un efecto no significativo sobre la variable ($p = 0.1032$), lo cual indica que la variabilidad entre bloques no fue determinante para la altura de la parte aérea de la planta. El coeficiente de variación (CV) fue de 2,39 %, lo que refleja una buena precisión experimental, ya que este valor es bajo, indicando poca variación relativa entre los datos, respecto a la media.

Tabla 3. ANOVA para la altura de parte aérea de las plantas expuestas a dos concentraciones de Cd.

F.v	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	sign.
bloque	2	0,011267	0,005633	4,225	0,1032	
tratamiento	2	0,0162	0,0081	6,075	0,0613	.
Residuals	4	0,005333	0,001333			
Signif. codes: 0 '***' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05 '.' 0,1 ' ' 1						
CV = 2,386591						

De acuerdo, a la prueba estadística de Tukey (5 %), se observó, que no existen diferencias estadísticas no significativas entre las medias de altura de parte aérea de la planta, correspondientes a las distintas concentraciones de cadmio evaluadas (Tabla 4). Todas las medias fueron agrupadas en la misma letra ("a"), lo que indica que las aplicaciones de 0

ppm, 5 ppm y 10 ppm de Cd no generaron cambios significativos en la altura de las plantas, al menos dentro de las condiciones de este experimento.

Tabla 4. Prueba estadística de Tukey (5 %) para la altura de parte aérea de las plantas expuestas a dos concentraciones de Cd.

Concentración de Cd (ppm)	Bloque			Promedio (m)	Tukey 0,05(*)
	I	II	III		
0	1.54	1.60	1.63	1.54	a
5	1.50	1.43	1.57	1.50	a
10	1.47	1.49	1.54	1.47	a

*Letras iguales indican resultados estadísticamente iguales

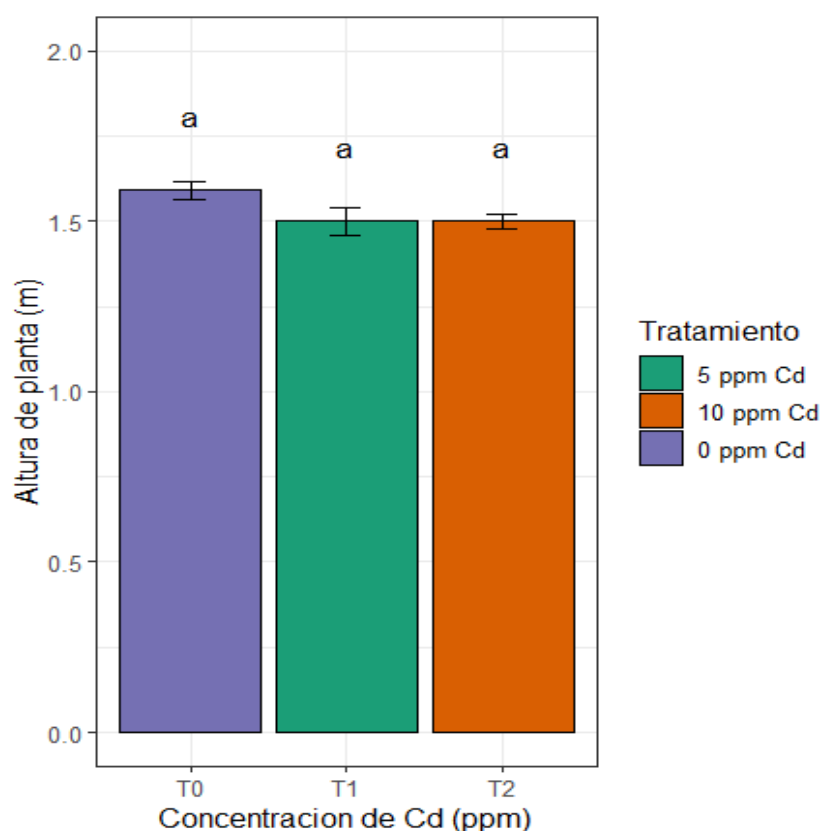


Figura 1. Efecto de dos concentraciones de Cd sobre la altura de parte aérea de la planta de banano (*Musa sapientum* L.).

4.2. Diámetro del pseudotallo

En la figura 2, se aprecia una disminución del diámetro del pseudotallo del banano en un 30 % con las dos concentraciones de Cd ensayadas. El análisis de varianza (Tabla 5) mostró diferencias altamente significativas entre los tratamientos aplicados ($p = 0,000346 < 0,001$) sobre el diámetro del pseudotallo. Esto indica que la aplicación de diferentes concentraciones de Cd influyó significativamente en esta variable. En contraste, el efecto del factor bloque fue estadísticamente no significativo ($p = 0,0975 > 0,05$), aunque presentó una tendencia ($p < 0,10$), lo que sugiere cierta variabilidad entre bloques, pero no lo suficiente como para afectar la comparación entre tratamientos.

El coeficiente de variación (CV) fue de 3,36 %, lo cual es considerado bajo, indicando buena precisión experimental y consistencia en las mediciones realizadas del diámetro del pseudotallo.

Tabla 5. ANOVA para el diámetro del pseudotallo de las plantas expuestas a dos concentraciones de Cd.

F.v	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	sign.
bloque	2	0.379	0.19	4.403	0.097551	.
tratamiento	2	9.085	4.542	105.53	0.000346	***
Residuals	4	0.172	0.043			
Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1						
CV = 3.360165						

La prueba estadística de Tukey al 5 % (Tabla 6) nos indica que el tratamiento testigo (0 ppm de Cd) presentó el mayor diámetro promedio del pseudotallo (7,59 cm), seguido por el tratamiento con 5 ppm de Cd, que obtuvo un promedio significativamente menor (5,53 cm). Además de, agruparlos con letras distintas ("a" y "b") lo que sugiere que existen diferencias estadísticas significativas entre estos tratamientos. Esto, demuestra que, la aplicación de cadmio, incluso a una dosis de 5 ppm, reduce significativamente el diámetro del pseudotallo en comparación con el tratamiento control.

Tabla 6. Prueba estadística de Tukey (5 %) para el diámetro del pseudotallo de las plantas expuestas a dos concentraciones de Cd.

Concentración de Cd	Bloque			Promedio (cm)	Tukey 0,05(*)
	I	II	III		
0 ppm	7.60	7.75	7.43	7.59	a
5 ppm	5.33	6.08	5.18	5.53	b
10 ppm	5.30	5.55	5.35	5.40	b

*Letras iguales indican resultados estadísticamente iguales.

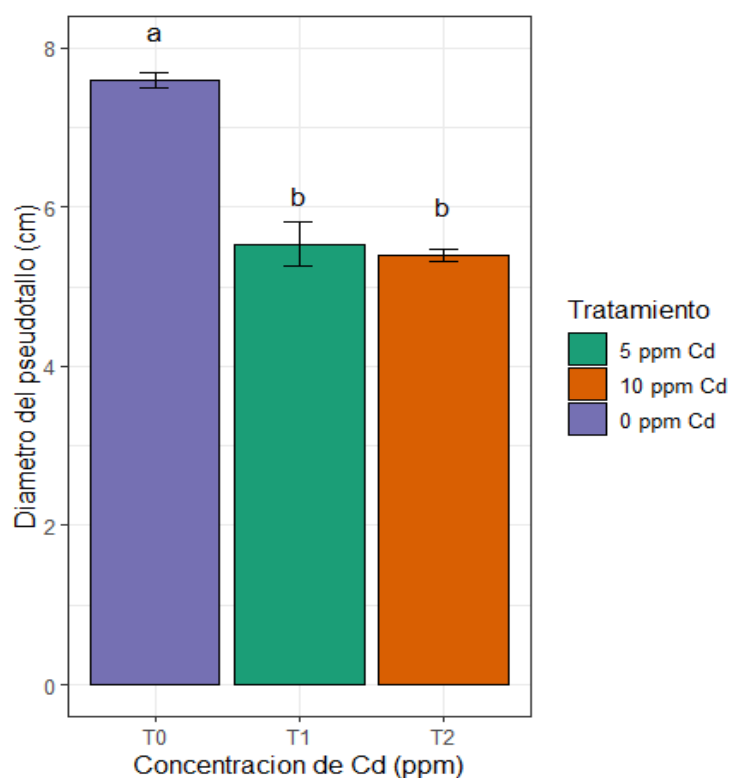


Figura 2. Efecto de dos concentraciones de Cd sobre el diámetro del pseudotallo de la planta de banano (*Musa sapientum* L.).

4.3. Diámetro del rizoma

Los resultados muestran un ligero disminución del diámetro del rizoma de las plantas banano cuando son expuestas al elemento Cd (Fig. 3). El análisis de varianza para la variable diámetro del rizoma (Tabla 7) mostró diferencias estadísticamente significativas ($p = 0,012 < 0,05$) entre los tratamientos con las diferentes concentraciones de cadmio (Cd) aplicadas, lo que indica que este elemento tuvo un efecto significativo sobre el diámetro del rizoma de las plantas evaluadas. El coeficiente de

variación fue de 2,69 %, lo cual indica una adecuada precisión experimental. El efecto del bloque fue marginalmente significativo ($p = 0,0774$), pero se mantuvo dentro de un rango aceptable.

Tabla 7. ANOVA para el diámetro del rizoma de las plantas expuestas a dos concentraciones de Cd.

F.v	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	sign.
bloque	2	0.2811	0.1405	5.187	0.0774	.
tratamiento	2	0.8804	0.4402	16.247	0.012	*
Residuals	4	0.1084	0.0271			
Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1						
CV = 2.690095						

La prueba de comparación múltiple de Tukey al 5 % (Tabla 8) muestra, que el tratamiento control presentó el mayor diámetro del rizoma (6.56 mm), ubicándose en el grupo estadístico "a". Por otro lado, los tratamientos con 5 ppm y 10 ppm de Cd tuvieron promedios menores (5,93 mm y 5,87 mm, respectivamente), y no difirieron significativamente entre sí, agrupándose ambos en la categoría "b". Esto sugiere que la presencia de Cd a partir de 5 ppm, ya afecta negativamente el crecimiento del rizoma.

Tabla 8. Prueba estadística de Tukey (5 %) para el diámetro del rizoma de las plantas expuestas a dos concentraciones de Cd.

Concentración de Cd	Bloque			Promedio (m)	Tukey 0,05(*)
	I	II	III		
0 ppm	6.60	6.58	6.50	6.56	a
5 ppm	6.33	5.85	5.60	5.93	b
10 ppm	6.13	5.80	5.68	5.87	b

*Letras iguales indican resultados estadísticamente iguales.

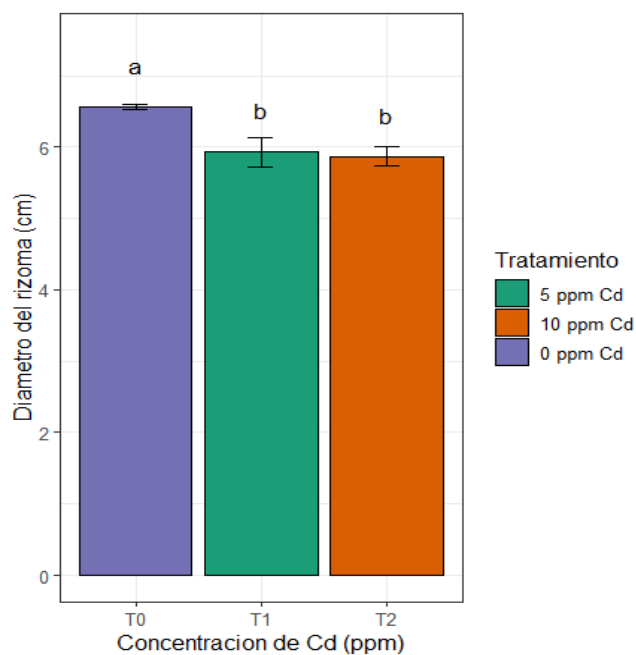


Figura 3. Efecto de dos concentraciones de Cd sobre el diámetro del rizoma de la planta de banano (*Musa sapientum* L.).

4.4. Biomasa fresca de hojas

Como se puede apreciar en la figura 4, numéricamente hay diferencia entre los tratamientos ensayados; sin embargo, el análisis de varianza (Tabla 9) mostró diferencias estadísticamente no significativas ($p = 0,0573 > 0,05$) entre los tratamientos con diferentes concentraciones de Cd, aunque el valor de p se encuentra cerca del umbral del 5 %, lo que indica una posible tendencia hacia diferencias que podrían volverse significativas con mayor número de repeticiones. El coeficiente de variación fue de 9,68 %, lo cual indica una precisión experimental aceptable. El efecto del bloque no fue significativo ($p = 0,9128$), sugiriendo que no influyó considerablemente en los resultados obtenidos.

Tabla 9. ANOVA para la biomasa fresca de hojas de plantas de banano expuestas a dos concentraciones de Cd.

F.v	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	sign.
bloque	2	9.3	4.64	0.093	0.9128	
tratamiento	2	631.9	315.94	6.356	0.0573	.
Residuals	4	198.8	49.71			
Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1						
CV = 9.675775						

El test de comparación múltiple de Tukey al 5 % (Tabla 10) mostró que hubo diferencias estadísticas no significativas entre los tratamientos, ya que todos los promedios se ubicaron en el mismo grupo estadístico "a". El tratamiento testigo presentó la mayor biomasa fresca de hojas (84,71 g), seguido por el tratamiento 10 ppm (67,34 g) y 5 ppm (66,55 g), lo que sugiere una disminución en la biomasa conforme se incrementa la concentración de Cd, aunque sin alcanzar diferencias estadísticamente significativas.

Tabla 10. Prueba estadística de Tukey (5 %) para la biomasa fresca de hojas de plantas de banano expuestas a dos concentraciones de Cd.

Concentración de Cd	Bloque			Promedio (m)	Tukey 0,05(*)
	I	II	III		
0 ppm	89.64	87.84	76.65	84.71	a
5 ppm	65.75	62.17	71.74	66.55	a
10 ppm	61.69	72.85	67.49	67.34	a

*Letras iguales indican resultados estadísticamente iguales.

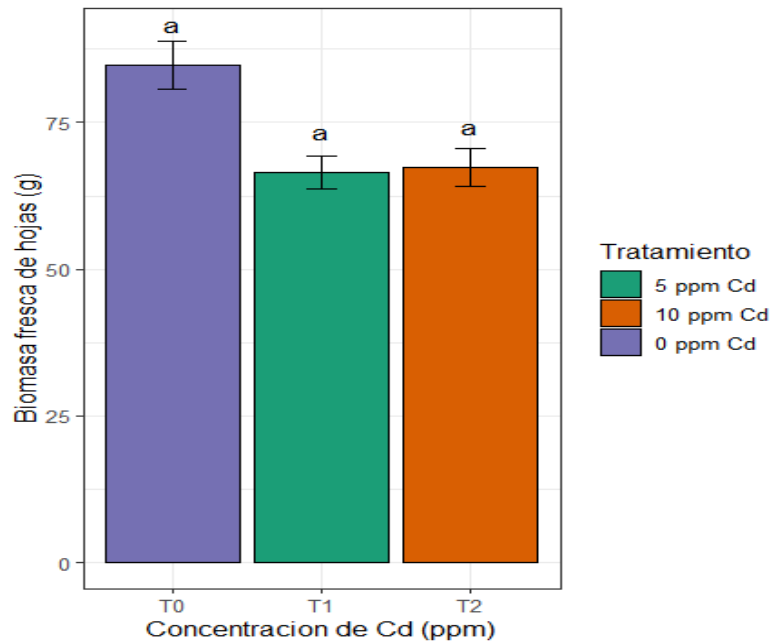


Figura 4. Efecto de dos concentraciones de Cd sobre la biomasa fresca de las hojas de la planta de banano (*Musa sapientum* L.).

4.5. Biomasa seca de hojas

Los resultados indican una diferencia numérica importante en la biomasa seca de las hojas entre los tratamientos (Fig. 5); aunque al realizar el análisis estadístico (Tabla 11) hubo diferencias estadísticamente no significativas ($p = 0,0798 > 0,05$) entre los tratamientos con las 2 concentraciones de Cd, aunque se observó una tendencia marginal ($p < 0.1$), lo que sugiere un posible efecto del Cd sobre la biomasa seca de hojas. El coeficiente de variación (CV) fue de 11,99 %, lo que indica una variabilidad moderada en los datos. El efecto del bloque no fue significativo ($p = 0,7928$), lo que indica uniformidad entre repeticiones.

Tabla 11. ANOVA para la biomasa seca de hojas de plantas de banano expuestas a dos concentraciones de Cd.

F.v	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	sign.
bloque	2	1.226	0.613	0.246	0.7928	
tratamiento	2	25.303	12.652	5.082	0.0798	.
Residuals	4	9.959	2.49			
Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1						
CV = 11.98574						

La prueba de comparación múltiple de Tukey al 5 % (Tabla 12) indica diferencias no significativas entre los tratamientos. Todos los tratamientos (0, 5 y 10 ppm de Cd) se agruparon en la misma categoría estadística "a", indicando que no hubo efecto estadísticamente comprobado del Cd sobre la biomasa seca de hojas. Sin embargo, se observó que el promedio más alto correspondió al tratamiento control (15,51 g), seguido por 5 ppm (12,29 g) y 10 ppm (11,69 g), lo cual indica una tendencia negativa del Cd sobre la biomasa seca, aunque no significativa estadísticamente.

Tabla 12. Prueba estadística de Tukey (5 %) para la biomasa seca de hojas de plantas de banano expuestas a dos concentraciones de Cd.

Concentración de Cd	Bloque			Promedio (m)	Tukey 0,05(*)
	I	II	III		
0 ppm	16.96	16.14	13.43	15.51	a
5 ppm	12.50	11.72	12.66	12.29	a
10 ppm	10.18	12.91	11.98	11.69	a

*Letras iguales indican resultados estadísticamente iguales.

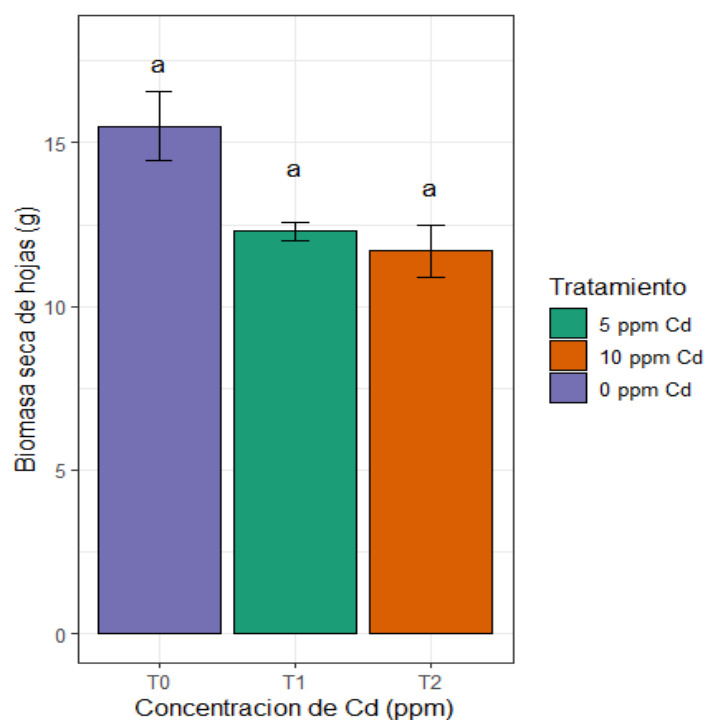


Figura 5. Efecto de dos concentraciones de Cd sobre la biomasa seca de las hojas de la planta de banano (*Musa sapientum* L.).

4.6. Biomasa fresca de raíces

Los resultados indicaron que no hay cambios significativos en la biomasa fresca de la raíz, cuando las plantas son tratadas con dos concentraciones de Cd (Fig. 6), lo que se ratifica con el análisis estadístico realizado. La ANOVA (Tabla 13) con un valor de $p = 0,458 > 0.05$, muestra que el Cd no generó efecto significativo alguno sobre esta variable. El efecto de los bloques tampoco fue significativo ($p = 0,376$), evidenciando que, la variación observada no se debió a la disposición de los tratamientos en el campo. El coeficiente de variación (CV) fue de 15,12 %, reflejando una dispersión moderada de los datos y una precisión experimental aceptable.

Tabla 13. ANOVA para la biomasa fresca de las raíces de plantas de banano expuestas a dos concentraciones de Cd.

F.v	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	sign.
bloque	2	864	432	1.263	0.376	
tratamiento	2	654.4	327.2	0.956	0.458	
Residuals	4	1368.3	342.1			
Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1						
CV = 15.12102						

La prueba de comparación múltiple de Tukey al 5 % (Tabla 14) indica que no existen diferencias significativas entre los tratamientos. Aunque, los valores correspondientes a las dos concentraciones ensayadas y el testigo, muestran diferencias numéricas altas, no alcanzaron significancia estadística, lo que sugiere que la aplicación de cadmio no tuvo efecto sobre esta variable.

Tabla 14. Prueba estadística de Tukey (5 %) para la biomasa fresca de las raíces de plantas de banano expuestas a dos concentraciones de Cd.

Concentración de Cd	Bloque			Promedio (m)	Tukey 0,05(*)
	I	II	III		
0 ppm	128.13	132.84	119.63	126.87	a
5 ppm	100.11	139.03	91.96	110.37	a
10 ppm	153.55	121.27	114.30	129.71	a

*Letras iguales indican resultados estadísticamente

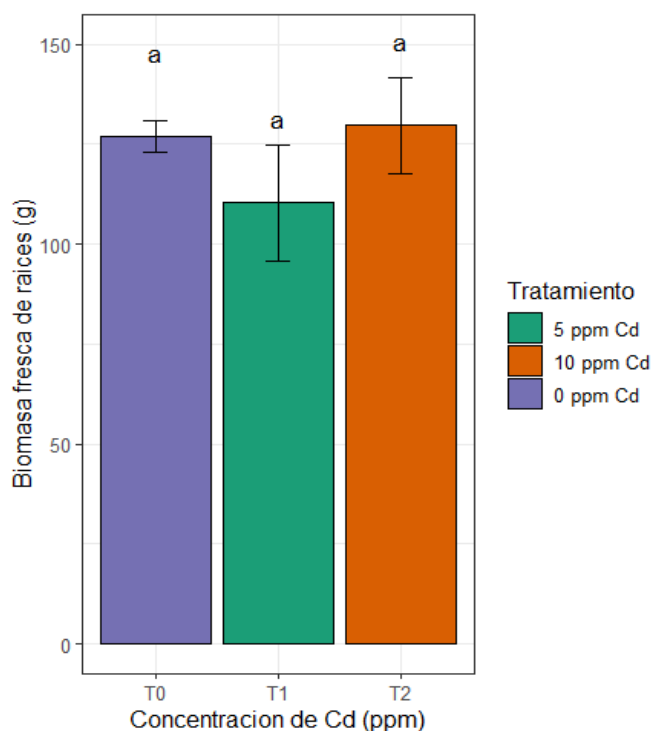


Figura 6. Efecto de dos concentraciones de Cd sobre la biomasa fresca de las raíces de la planta de banano (*Musa sapientum* L.).

4.7. Biomasa seca de las raíces

En la figura 7, se aprecia ligeras variaciones de la biomasa seca de las raíces, cuando se aplica las concentraciones de 5 y 10 ppm de cadmio al sustrato en que crecieron las plantas de banano. El análisis de varianza (Tabla 15) realizado refleja que ningún tratamiento ($p > 0,05$) difiere significativamente de otro en términos de biomasa seca de las raíces.

Tabla 15. ANOVA para la biomasa seca de las raíces de plantas de banano expuestas a dos concentraciones de Cd.

F.v	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	sign.
bloque	2	2.159	1.08	1.046	0.431	
tratamiento	2	8.794	4.397	4.26	0.102	
Residuals	4	4.129	1.032			
Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1						
CV = 10.27974						

Asimismo, la prueba de comparación múltiple de Tukey al 5 % (Tabla 16) indica que, a pesar de la diferencia numérica entre los valores encontrados con las dos concentraciones ensayadas y el testigo, no alcanzaron significancia estadística, lo que sugiere que la aplicación de cadmio no tuvo efecto sobre esta variable.

Tabla 16. Prueba estadística de Tukey (5 %) para la biomasa seca de las raíces de plantas de banano expuestas a dos concentraciones de Cd.

Concentración de Cd	Bloque			Promedio (m)	Tukey 0,05 (*)
	I	II	III		
0 ppm	10.32	10.55	10.27	10.38	a
5 ppm	8.56	10.12	6.83	8.50	a
10 ppm	11.50	10.30	10.50	10.77	a

*Letras iguales indican resultados estadísticamente iguales.

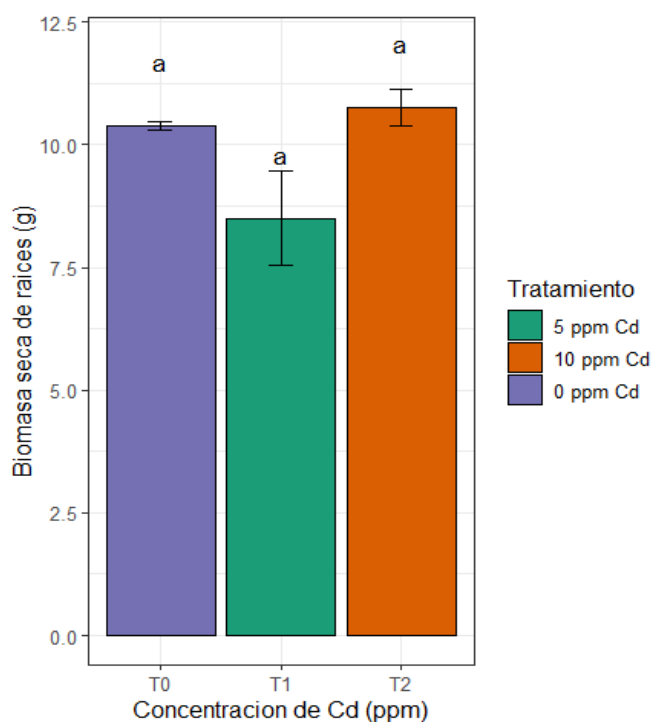


Figura 7. Efecto de dos concentraciones de Cd sobre la biomasa seca de las raíces de la planta de banano (*Musa sapientum* L.).

4.8. Relación entre variables Morfológicas y el contenido de Cd en los órganos vegetativos y suelo.

En la figura 8, se aprecia que, las concentraciones de Cd en suelo (C_Cd_S), raíces (C_Cd_R) y pseudotallo (C_Cd_T) presentaron correlaciones negativas severas con la mayoría de las variables morfológicas. En particular, el diámetro del pseudotallo (DIA_PSE) y el diámetro del rizoma (DIA_RIZ) mostraron las correlaciones más altas y negativas con Cd en pseudotallo y raíces ($r = -0,97$ y $r = -0,88$, respectivamente), indicando que, la acumulación de Cd reduce significativamente el grosor de estos órganos estructurales. Asimismo, la biomasa seca del pseudotallo (BIO_SEC_T) también se vio fuertemente afectada ($r = -0,87$ con Cd en suelo), evidenciando una disminución en la producción de materia seca conforme se incrementa la concentración de Cd.

Por otro lado, se identificaron correlaciones positivas altas entre las variables de crecimiento y biomasa. La altura de planta (ALT) presentó asociaciones positivas con el diámetro del pseudotallo ($r = 0,56$), la biomasa fresca de hojas ($r = 0,66$) y la biomasa seca de hojas ($r = 0,54$), reflejando que, un mayor crecimiento en altura se relaciona con una mayor acumulación de biomasa foliar. Asimismo, el diámetro del pseudotallo y el diámetro del rizoma estuvieron fuertemente correlacionados ($r = 0,80$), manifestando que, el engrosamiento de ambos órganos ocurre de manera conjunta bajo condiciones normales de crecimiento.

En cuanto a la relación entre compartimentos, las concentraciones de Cd en el suelo, raíces y pseudotallo estuvieron altamente correlacionadas entre sí ($r > 0,93$), estableciendo un patrón consistente de absorción y traslocación del metal dentro de la planta, los resultados confirman que el cadmio ejerce un efecto tóxico directo sobre el crecimiento y la biomasa de la planta, afectando principalmente al pseudotallo y al rizoma, mientras que, variables como la biomasa fresca de las raíces y la altura de la parte aérea de la planta mostraron una menor sensibilidad al aumento de Cd.

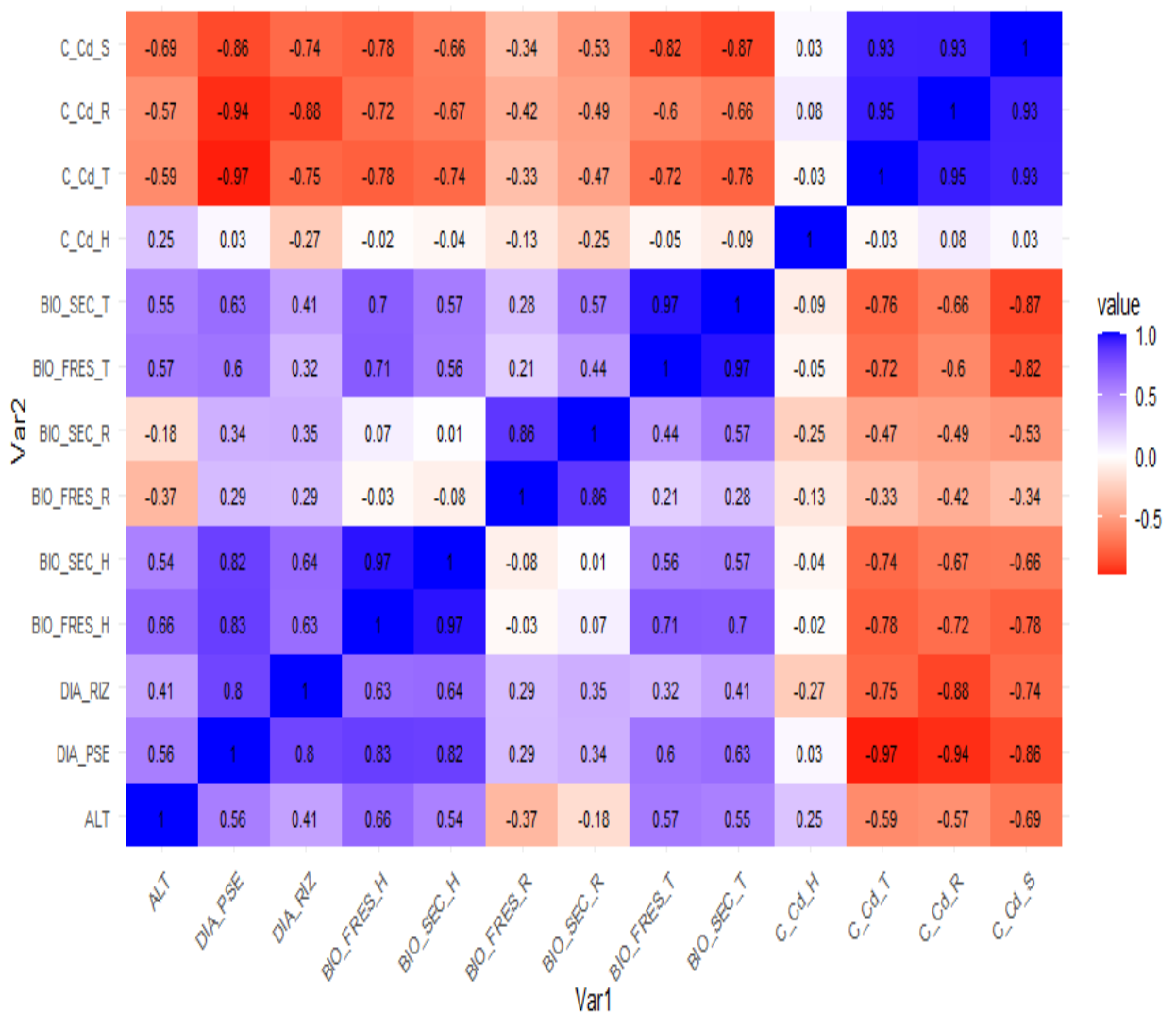


Figura 8. Correlación múltiple de Pearson entre variables Morfológicas y el contenido de Cd en tejido vegetal de plantas de banano (*Musa sapientum* L.) y suelo.

4.9. Mapa de calor (Heatmap) del contenido de elementos minerales en los órganos vegetativos y suelo.

La figura 9, mapa de calor se presentan las concentraciones estandarizadas de 25 elementos químicos en las muestras analizadas, donde cada fila corresponde a una combinación tratamiento-órgano (por ejemplo, T0_0ppm_S = suelo con 0 ppm de Cd), y cada columna a un elemento químico. A la izquierda y parte superior aparecen dendrogramas

que representan la agrupación jerárquica (clustering), tanto de las muestras como de los elementos químicos. Además, se adicionan barras de colores que indican (i) el órgano evaluado (órgano: hoja = amarillo, raíz = morado, suelo = naranja/verde, tallo = color rosa) y (ii) la dosis de Cd aplicada (D.Cd: azul = 0 ppm, verde = 5 ppm, rojo = 10 ppm).

En conjunto, el mapa permite identificar patrones de acumulación, semejanza entre elementos y relaciones órgano-tratamiento de forma visual y sintetizada.

El agrupamiento de filas (muestras): dominancia del órgano sobre la dosis. Las muestras tienden a agruparse por órgano (hoja, raíz, tallo y suelo). Esto se aprecia en las franjas de colores verticales del lateral izquierdo, donde las filas del mismo órgano aparecen en ramas próximas del dendrograma. Las raíces forman un grupo coherente y presentan patrones semejantes entre sí.

Las hojas se agrupan por separado y muestran un patrón distinto de elementos dominantes.

El suelo se ubica en su propia rama, con un perfil propio de elementos.

Esto indica que el órgano muestreado explica una mayor parte de la variación composicional que la sola concentración aplicada, si bien esta (barra D.Cd) aporta subvariación dentro de cada grupo.

Agrupamiento de columnas (elementos): dos (o más) bloques funcionales

El dendrograma superior separa los elementos en grupos con comportamientos similares:

- Grupo de metales pesados / trazas asociadas a contaminación (Cd, Pb, Zn, Cu, Ba, Al, Co, Ni, Cr, Sb, etc.).

Estas columnas tienden a presentar intensidades altas (naranjas/rojos) en filas correspondientes a raíces y en ocasiones a suelo, especialmente en las muestras de concentración 5 y 10 ppm (barra roja/verde).

En ese contexto, el análisis de los datos obtenidos, muestran que, las raíces y rizoma retienen los metales y actúan como sumidero, y las concentraciones

en suelo se reflejan con mayor intensidad en las raíces. Ello, sugiere que, estos elementos se absorben y almacenan en la raíz y rizoma de las plantas.

El grupo de elementos esenciales (Ca, K, Mg, Mn, Na... entre otros) ubicados en las columnas muestran mayor intensidad en los órganos fotosintéticos (hojas y pseudotallo), concordando con su función fisiológica en el crecimiento de la planta, predominando en mayor cantidad en las muestras control o con baja translocación de Cd.

Los elementos con patrón intermedio o independiente (Mo, Ag, Ta, Hg, Be...entre otros), presentan un comportamiento más heterogéneo, con picos aislados en ciertas muestras. Pueden deberse a variabilidad natural de su contenido en el sustrato, absorción por la planta, contaminación puntual o interacción específica con Cd.

Patrones tratamiento-órgano:

Raíces (R), en concentraciones de 5 y 10 ppm muestran casillas de alta intensidad en la columna Cd (rojo/anaranjado), y paralelamente intensidades altas en Pb, Zn, Cu y Ba. Esto, confirma lo observado en el PCA: acumulación de Cd y metales asociados en raíces a medida que aumenta la concentración aplicada.

Suelo (S), refleja igualmente incrementos en columnas de metales pesados en los tratamientos con Cd, sugiriendo que, la cantidad aplicada en el sustrato queda disponible y se correlaciona con las concentraciones medidas en raíces/pseudotallo.

Hojas (H), en general, se aprecia menores intensidades en Cd y metales pesados (más casillas claras/azules para Cd), pero mayores intensidades en nutrientes (Ca, K, Mn, Mg). Esto, se correlaciona con una limitada traslocación de Cd hacia hojas y un almacenamiento de elementos esenciales en el follaje.

Tallos/pseudotallo (T), exhiben un patrón intermedio; hay ciertas columnas (p. ej. Mo, Na o Ag) con picos puntuales que podrían indicar mecanismos de transporte o almacenamiento temporal.

Algunas relaciones más relevantes señaladas por el mapa, se detallan a continuación:

Co-ocurrencia Cd–Zn–Pb–Cu–Ba en raíces y suelo: las columnas de estos elementos aparecen juntas en la misma rama del dendrograma y muestran picos en las mismas filas, lo que implica comportamiento similar de absorción/retención o fuentes comunes.

Antagonismo aparente Cd vs nutrientes (K, Ca, Mg, Mn): donde las casillas de Cd son intensas (raíces con 10 ppm), mientras que las de nutrientes tienden a ser menos intensas en las mismas filas, lo que visualmente sugiere posibles efectos antagonistas o desplazamiento iónico (coincide con correlaciones negativas observadas).

Homogeneidad en hojas para biomasa/nutrientes: las hojas mantienen un patrón estable de alta presencia relativa de elementos esenciales; a pesar del incremento de Cd en el suelo, lo que apunta a mecanismos de exclusión o barrera que protegen el follaje.

Un análisis de las implicaciones fisiológicas y ambientales, nos indica que, las raíces actúan como primera línea de defensa: almacenando la mayor parte del Cd y metales pesados asociados, limitando su movilidad hacia el pseudotallo y hojas. Esto reduce la exposición del tejido fotosintético, pero implica mayor riesgo de acumulación radicular.

Mayor concentración de Cd en el suelo (intensidad creciente en filas con barra roja-10 ppm) implica una mayor absorción.

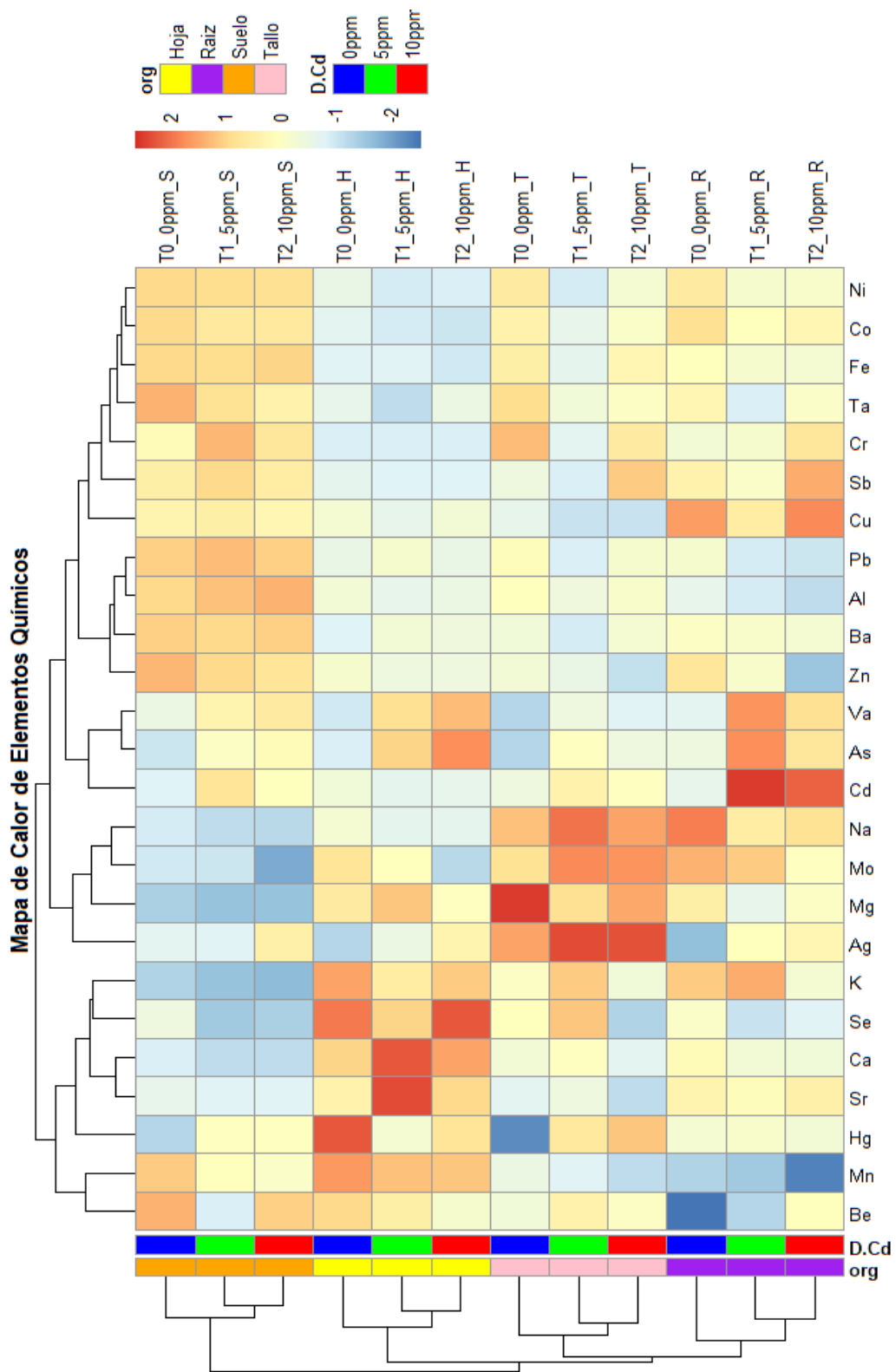


Figura 9. Mapa de calor de los elementos químicos y su distribución en los órganos vegetativos de la planta de banano (*Musa sapientum* L.) y suelo.

CAPÍTULO V

DISCUSION

La toxicidad del Cd en plantas ha sido reportada en numerosos estudios, ocasionando inhibición del crecimiento y alteraciones a nivel morfológico y fisiológico en raíces, tallos, hojas y frutos (Hernández, et al., 2019, Guosheng et al., 2014, Pernia et al., 2021, Ortiz et al., 2022, Fernández y Yanchatipán, 2024, Villalaz-Pérez et al., 2024, Gutiérrez-Martínez et al., 2024, Pastor, 2025, Lin, et al., 2023).

En banano, se han descrito efectos negativos de este elemento en el crecimiento del banano (Elazab et al., 2023, Liu et al., 2020). Los bioensayos con las concentraciones de 5 y 10 ppm de cadmio ($\text{CH}_3\text{COO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) quelatizado con EDTA), en sistema hidropónico con solución nutritiva mineral comercial de la Universidad Agraria La Molina, tuvieron un efecto tóxico directo sobre el crecimiento, afectando principalmente al pseudotallo y rizoma, mientras que, algunos parámetros como la biomasa fresca de hojas y la altura de la parte aérea de la planta mostraron una menor sensibilidad al elemento Cd.

Flores et al. (2018) en un estudio de campo en plantaciones de banano cercanas a zonas industriales, encontraron también una acumulación significativa de cadmio en las hojas y raíces de *Musa spp.*, con niveles en suelo que excedían los límites permisibles por organismos internacionales. Las raíces de las plantas y el rizoma son órganos que actúan como principales sumideros de compuestos químicos, concentraciones altas de Cd en el suelo, podrían ocasionar su mayor absorción y almacenamiento en estos órganos.

Dado que, el banano es una planta perenne con alta demanda hídrica y nutricional, las diferentes respuestas de su sensibilidad a contaminantes como el cadmio, podría variar significativamente dependiendo de factores como la

edad de la planta, la variedad cultivada, el tipo de suelo, fuente del producto y la concentración de exposición.

La inhibición del crecimiento por efecto del Cd, podría ser consecuencia de efectos citotóxicos, que alterarían la morfología celular en las raíces, induciendo cambios en la permeabilidad de la membrana citoplasmática, afectando los transportadores de Ca^{2+} , favoreciendo la acumulación de Cd y otros metales pesados y el transporte selectivo de iones esenciales (Marcano et al., 2001, Peláez-Peláez et al., 2016) que forman parte de enzimas y metabolitos primarios relacionados con el crecimiento de las plantas. Ello, contrasta con lo encontrado en hojas y pseudotallo del banano, donde se correlaciona una limitada translocación de Cd y otros metales pesados (Pb, Zn, Cu, Cr, As y Ba) con un almacenamiento de elementos nutritivos (Ca, K, Mn, Mg), a pesar del incremento de Cd en el suelo, lo que apunta a mecanismos de exclusión o barrera de protección al follaje. La presencia de algunos micro elementos, como el Zn y Fe en la solución nutritiva mineral, podrían reducir la translocación de Cd en plantas de banano, tal como lo refiere El-Mahdy et al. (2021), lo que constituye una estrategia interesante a tener en cuenta en la instalación de cultivos en suelos contaminados.

Se describe también la posibilidad que, la reducción del crecimiento podría deberse a una disminución de la actividad enzimática en el proceso de la fotosíntesis por efecto del Cd, que se intercambia con el Fe o Mg (Raven, 2018) produciendo clorosis, que no hubo en nuestro caso.

Este tipo de contaminación abiótico es especialmente preocupante, ya que la bioacumulación del metal en el fruto, no solo altera su calidad, sino también la salud del consumidor final, y por ende la economía de los agricultores bananeros.

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES

1. Las concentraciones de 5 y 10 ppm de cadmio ($\text{CH}_3\text{COO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) quelatizado con EDTA), incorporadas en la solución nutritiva mineral comercial de la Universidad Agraria La Molina, tuvieron un efecto tóxico directo sobre el crecimiento, afectando principalmente al pseudotallo y rizoma, mientras que, la altura de la parte aérea de la planta, biomasa fresca y seca de hojas y raíces mostraron una menor sensibilidad al elemento Cd.
2. Las raíces actúan como principales sumideros, al almacenan la mayor parte del Cd y metales pesados asociados (Cd, Cr, Sb, Cu, As, Ba), limitando su transporte hacia el pseudotallo y hojas.
3. En las hojas y pseudotallo existe una correlación entre la translocación de Cd y otros metales pesados con un almacenamiento de elementos nutritivos (Ca, Na, K, Mo, Mn, Mg), sugiriendo posibles efectos antagonistas o desplazamiento iónico.

CAPÍTULO VII

RECOMENDACIONES

1. Realizar experimentos para medir estrés oxidativo por efecto del cadmio, a nivel celular, fisiológico y metabólico.
2. Ensayar otras concentraciones de Cd en diferentes variedades de banano para evaluar otros parámetros de crecimiento, incluyendo producción y calidad de los frutos,
3. Realizar ensayos, incorporando ácidos orgánicos a las soluciones nutritivas, afín de evaluar su relación con la translocación del Cd en plantas.

CAPÍTULO VII

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Aguirre, H., Viteri, P. & Mayia, Y.M. (2022). Fitotoxicidad del cadmio sobre la germinación y crecimiento inicial de variedades de maíz Ecuatorianas. *Bioagro* [En línea]. 34(1), 3-14. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1007/978-94-007-4470-7>
- Alarcon N.C (2024). Análisis de plomo y cadmio en el fruto de *Mangifera indica* L. (mango), en el sector linderos, Provincia de Jaén – Cajamarca. Universidad Nacional Agraria de Jaén. Tesis de Ingeniero Forestal y Ambiental.
- Alvarado, F.Y. (2021). Determinación de metales pesados - arsénico, cadmio, mercurio y plomo - en banano orgánico producido en el distrito de Buenos Aires, Valle Alto Piura – Morropón. Universidad Nacional de Piura. Tesis de Ingeniero Agroindustrial e Industrias Alimentarias.
- Alloway, B. J. (2013). Heavy metals in soils: Trace metals and metalloids in soils and their bioavailability (3rd ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-4470-7>
- Arévalo, E., Obando, M., Zúñiga, L., Arévalo, C., Baligar, B., He, Z. (2016). Metales pesados en suelos de plantaciones de cacao (*Theobroma cacao* L) en tres regiones del Perú. *Ecología aplicada*. 15, 81-89
- Benavides, M. P., Gallego, S. M., & Tomaro, M. L. (2005). Cadmium toxicity in plants. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 17(1), 21–34. <https://doi.org/10.1590/S1677-04202005000100003>
- Clemens, S., Aarts, M. G. M., Thomine, S., & Verbruggen, N. (2013). Plant science: The key to preventing slow cadmium poisoning. *Trends in Plant Science*, 18(2), 92–99. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2012.08.003>
- Elazab, D., Abdel-Wahab, D. A., & El-Mahdy, M. M. (2023). Assessment of salicylic acid as a pretreatment on alleviating cadmium toxicity in banana. *Plant Molecular Biology Reporter*, 41(2), 378–391.
- El-Mahdy, M. M., Elazab, D. A., & El-Demerdash, H. A. (2021). Iron and zinc supplies mitigate cadmium toxicity in micropropagated banana. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 144(3), 627–638. <https://doi.org/10.1007/s11240-020-01971-6>
- Flores, C., Santos, M., & Gomes, A. (2018). Heavy metals accumulation in banana (*Musa* spp.) leaves from industrial areas in Rio de Janeiro. *Science of the Total Environment*, 627, 1235–1241. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.310>

- Furcal, P., & Torres, J. (2020). Determinación de concentraciones de cadmio en plantaciones de *Theobroma cacao* L. en Costa Rica. *Tecnología en Marcha*, 33(1), 122-137.
- Furcal-Beriguete, P., & Torres-Morales, J. (2020). Determinación de concentraciones de cadmio en plantaciones de *Theobroma cacao* L. en Costa Rica. *Tecnología en marcha*, 33(1), 122-137.
- García-Rodríguez, G. P. García-Cárdenas, A. R. Montaña-Rodríguez, M. A. Altamirano-Lozano (2014). Efecto genotóxico y citotóxico de la exposición a metales pesados (cromo [VI] y talio [I]) en ratones de la cepa CD-1: micronúcleos, apoptosis y viabilidad celular. *Ciencias Médicas* 24 (2), 91-96.
- Guosheng, Shao; Xiufu, Zhang y Guoping, Zhang (2014). Effects of cadmium stress on plant growth and antioxidative enzyme system in different rice genotypes. *Search life-sciences literature* [En línea]. 18(3), 239-244. Disponible en: <https://europepmc.org/>
- Gutiérrez-Martínez, P. B., Ramírez-Hernández, B. C., & Maldonado-Villegas, M. M. (2024). Efecto del cadmio en el contenido de pigmentos fotosintéticos, estructura de la raíz, y concentración de nutrientes en plantas de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.). *Scientia Agropecuaria*, 15(4), 483-493.
- Khan, M. N., Mobin, M., Abbas, Z. K., & Alamri, S. A. (2022). Cadmium stress in plants: Toxic effects, tolerance mechanisms, and management strategies. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(5), 5934–5950. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-15737-6>
- Londoño, F.L.F., Londoño, M.P.T., Muñoz, G., F.G. (2016). Los riesgos de los metales pesados en la salud humana y animal. *Rev.Bio.Agro* [online]. 14(2),145-153. ISSN 1692-3561. [https://doi.org/10.18684/BSAA\(14\)145-153](https://doi.org/10.18684/BSAA(14)145-153).
- Liu, X., Wang, Y., & Sun, H. (2020). In vitro morpho-physiological performance and DNA stability of banana under cadmium and drought stresses. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 143(2), 307–319. <https://doi.org/10.1007/s11240-020-01856-8>
- Londoño-Franco.F., Londoño-Muñoz,P.T, Muñoz-García, F.G. (2016). Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial 14(2), 145-153.
- Marcano, L., Carruyo, I. & Montiel, X. (2001). Alteraciones citológicas inducidas por el cadmio en células meristemáticas de raíces de cebolla (*Allium cepa* L). *Rev. Fac. Agron. (LUZ)*. 2001, 18: 247-257.

- Ministerio de Agricultura (2016). Informe del Monitoreo de Contaminantes en Alimentos Agropecuarios Primarios. Subdirección de Inocuidad Agroalimentaria/DIAIA, 108 pp.
- Ministerio del Ambiente. (2017). Decreto Supremo N° 011-2017-MINAM, Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Suelo. *Diario Oficial El Peruano*. <https://bit.ly/3XGo4td>
- Mendoza-López K.L.et al. (2021). Cadmio en plantaciones de Theobroma cacao L. "cacao" en la región San Martín (Lamas), Perú. *Manglar* 18(2): 169-173.
- Ortiz, M.C., Pernía, C.B.S., Mosquera, A., Gallardo C.A., Javier Landívar, V. J. (2022). El cadmio y su efecto en el crecimiento de la caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) Instituto de Investigación Científica y Desarrollo de Tecnologías INCYT, Santa Elena, Ecuador.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (217). Producción de banano orgánico en el Perú. Disponible en: <http://www.fao.org/publications/card/es/c/b1f6603d-4ae9-445f-b583-cd381f788d58/>
- Pernia, B., Añazco, K., Mero, M., Mayía, Y., Cobos, P. (2021). Efectos del cadmio sobre la germinación y crecimiento inicial de cinco variedades de *Oryza sativa* L. cultivadas en Ecuador. *Acta Agronómica*. 70 (1), 82-92
- Peláez-Peláez MJ, Bustamante-Cano JJ, Gómez-López ED. (2016). Presencia de cadmio y plomo en suelos y su bioacumulación en tejidos vegetales en especies de *Brachiaria* en el Magdalena Medio colombiano. *Luna Azul*, 15 (43), 82–101.
- Pastor, P.C. (2025). Evaluación del crecimiento, rendimiento, absorción y estrés oxidativo en plantas de tomate (*solanum Lycopersicum* L.) sometidas a diferentes concentraciones de cadmio. Universidad Nacional Agraria La Molina. Tesis de Biologo.
- Quinde, L.G.S. (2018). Determinación del grado de contaminación por presencia de metales pesados en suelos, raíces, hojas y frutas en plantas de banano debido al uso de agroquímicos en una finca ubicada en la Provincia de Los Ríos. Tesis de Magister en Ciencias Ambientales. Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil-Ecuador.
- Robinson, J. C., & Galán Saúco, V. (2010). Bananas and plantains (2nd ed.). CABI Publishing. <https://doi.org/10.1079/9781845936587.0000>

- Reyes Y, Vergara I, Torres O, Díaz M, González E. (2016). Contaminación por metales pesados Implicaciones en salud, ambiente y seguridad alimentaria. *Ingeniería Investigación y Desarrollo*. 16(2), 66–77.
- Raven, Klaus (2018). Efectos del cadmio sobre el crecimiento y la composición elemental de la alfalfa en cultivo de arena. *Dialnet* [En línea]. 79(2). 406-414 ISSN 2519-7398 Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6830799>.
- Reyes, Y. C. (2020). Estudio de bioacumulación de metales pesados en plantas de consumo humano para sensado molecular In situ. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana.
- Santos, E.E., Lauria, D.C., Porto, D.A. and Silveira, C.L. (2012). Assesment of daily intake of trace elements due to consumption of foodstuffs by adult inhabitants of Rio de Janeiro city. *Science of the Total Environment*, 2(3), 327-349.
- Soto, H., Rodríguez, L., Oliver, M., Arostegui, V., & Colina C. (2015). Determinación de metales pesados en suelos y productos agrícolas de la zona minera la Pastora. Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios – Oficina General de Investigación.
- Sánchez Barrón G. (2016) Ecotoxicología del cadmio. Riesgo para la salud de la utilización de suelos ricos en cadmio. Trabajo de Grado. Facultad de Farmacia. Universidad Complutense de Madrid, España.
- Tonolli A., Greco, S., & Sarandon, S. (2019). Algunos aspectos emergentes y de importancia para la construcción del enfoque Agroecológico. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias UNcuayo*, 51(1), 205-212.
<https://doi.org/https://revistas.uncu.edu.ar/Ojs3/index.php/RFSA/article/view/2432/>
- Unión Europea-UE. Reglamento (UE) No 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. 2014.
- Villalaz-Pérez, J., Villarreal-Núñez, J., Santo-Pineda, A., Gutiérrez-Lezcano, A., & Merino, A. (2024). Efecto del índice de estrés hídrico sobre el estado vegetativo de la planta de cacao. *Ciencia Agropecuaria*, (38), 84-104. Recuperado a partir de <http://www.revistacienciaagropecuaria.ac.pa/index.php/ciencia-agropecuaria/article/view/628>

- Velásquez-Vélez, M.I., Galvis-Lora, C., Mejía-Córdoba, C.A., Jaime Enrique Zapata-Guzman, J.E. (2022). Implicaciones de la acumulación de Cadmio en la cadena productiva del cacao. *Manglar* 19(4): 391-397.
- Wang, X., Zhang, Z., Tu, S., Feng, W., Xu, F., Zhu, F., Zhang, D., Du, J., Yuan, S. y Lin, H. (2013). Comparative study of four rice cultivars with different levels of cadmium tolerance. *Biología*, 68(1), 74-81. <https://pubag.nal.usda.gov/catalog/101411>

ANEXO

MARZO														
DIA														
HORA	LUNES 4		MARTES 5		MIERCOLES 6		JUEVES 7		VIERNES 8		SABADO 9		DOMINGO 10	
	T°	HR°	T°	HR°	T°	HR°	T°	HR°	T°	HR°	T°	HR°	T°	HR°
7:30 am	26.0°C	90%	26.5°C	68%	26.8°C	86%	26.4°C	60%	27.3°C	88%	27.2°C	70%	26.7°C	62%
12:00 pm	31.5°C	77%	32.1°C	57%	31.5°C	75%	29.5°C	64%	30.7°C	82%	30.1°C	68%	30.3°C	53%
15:00 pm	29.8°C	71%	29.6°C	42%	29.8°C	67%	28.3°C	58%	28.4°C	76%	29.2°C	67%	29.1°C	47%
HORA	LUNES 11		MARTES 12		MIERCOLES 13		JUEVES 14		VIERNES 15		SABADO 16		DOMINGO 17	
	T°	HR°	T°	HR°	T°	HR°	T°	HR°	T°	HR°	T°	HR°	T°	HR°
7:30 am	26.2°C	88%	27.4°C	78%	26.8°C	89%	27.8°C	74%	26.6°C	90%	25.4°C	74%	27.1°C	56%
12:00 pm	31.1°C	77%	30.5°C	70%	30.9°C	85%	30.8°C	65%	30.6°C	85%	30.2°C	69%	29.7°C	50%
15:00 pm	28.4°C	68%	29.2°C	67%	28.8°C	80%	28.3°C	58%	27.8°C	79%	28.6°C	61%	29.9°C	43%
HORA	LUNES 18		MARTES 19		MIERCOLES 20		JUEVES 21		VIERNES 22		SABADO 23		DOMINGO 24	
	T°	HR°	T°	HR°	T°	HR°	T°	HR°	T°	HR°	T°	HR°	T°	HR°
7:30 am	26.4°C	88%	25.7°C	68%	26.7°C	87%	25.6°C	67%	25.2°C	90%	26.6°C	70%	27.1°C	52%
12:00 pm	30.2°C	81%	30.2°C	64%	29.6°C	79%	29.2°C	58%	29.8°C	83%	30.2°C	65%	29.8°C	43%
15:00 pm	29.5°C	76%	29.1°C	58%	27.4°C	72%	27.6°C	51%	26.7°C	76%	27.9°C	58%	28.2°C	36%
HORA	LUNES 25		MARTES 26		MIERCOLES 27		JUEVES 28		VIERNES 29		SABADO 30		DOMINGO 31	
	T°	HR°	T°	HR°	T°	HR°	T°	HR°	T°	HR°	T°	HR°	T°	HR°
7:30 am	28.0°C	89%	26.2°C	70%	26.4°C	90%	25.4°C	70%	26.2°C	91%	25.5°C	71%	25.6°C	57%
12:00 pm	29.7°C	81%	30.1°C	66%	29.8°C	84%	29.3°C	66%	29.8°C	85%	30.4°C	67%	30.3°C	51%
15:00 pm	27.3°C	76%	27.8°C	61%	27.6°C	78%	28.1°C	59%	27.3°C	79%	27.4°C	62%	28.2°C	44%

ABRIL														
DIA														
HORA	LUNES 1		MARTES 2		MIERCOLES 3		JUEVES 4		VIERNES 5		SABADO 6		DOMINGO 7	
	T°	HR°	T°	HR°	T°	HR°	T°	HR°	T°	HR°	T°	HR°	T°	HR°
7:30 am	25.0°C	90%	26.5°C	67%	25.8°C	88%	26.0°C	60%	26.3°C	90%	25.9°C	69%	26.3°C	55%
12:00 pm	30.5°C	84%	30.1°C	59%	30.5°C	78%	30.8°C	63%	31.6°C	83%	31.0°C	64%	29.3°C	47%
15:00 pm	28.8°C	78%	29.4°C	50%	29.3°C	71%	29.1°C	57%	27.2°C	75%	27.3°C	61%	27.7°C	41%
HORA	LUNES 8		MARTES 9		MIERCOLES 10		JUEVES 11		VIERNES 12		SABADO 13		DOMINGO 14	
	T°	HR°	T°	HR°	T°	HR°	T°	HR°	T°	HR°	T°	HR°	T°	HR°
7:30 am	26.2°C	88%	26.4°C	57%	25.8°C	89%	26.2°C	72%	25.6°C	92%	26.4°C	73%	25.1°C	55%
12:00 pm	31.1°C	77%	30.0°C	51%	29.9°C	84%	31.8°C	66%	31.6°C	83%	30.1°C	68%	30.6°C	49%
15:00 pm	28.4°C	68%	28.2°C	46%	27.3°C	79%	27.3°C	57%	26.8°C	77%	27.6°C	62%	28.9°C	42%
HORA	LUNES 15		MARTES 16		MIERCOLES 17		JUEVES 18		VIERNES 19		SABADO 20		DOMINGO 21	
	T°	HR°	T°	HR°	T°	HR°	T°	HR°	T°	HR°	T°	HR°	T°	HR°
7:30 am	26.0°C	91%	26.7°C	67%	25.8°C	88%	26.1°C	66%	26.2°C	90%	25.6°C	68%	26.1°C	42%
12:00 pm	30.7°C	84%	30.4°C	63%	30.6°C	76%	30.2°C	59%	31.5°C	82%	31.2°C	62%	30.8°C	36%
15:00 pm	27.6°C	77%	27.1°C	56%	28.4°C	70%	27.0°C	52%	26.3°C	74%	26.9°C	48%	27.2°C	31%
HORA	LUNES 22		MARTES 23		MIERCOLES 24		JUEVES 25		VIERNES 26		SABADO 27		DOMINGO 28	
	T°	HR°	T°	HR°	T°	HR°	T°	HR°	T°	HR°	T°	HR°	T°	HR°
7:30 am	26.7°C	93%	25.2°C	73%	27.0°C	90%	26.3°C	68%	26.1°C	90%	26.5°C	70%	26.6°C	56%
12:00 pm	30.7°C	88%	31.1°C	65%	30.9°C	83%	31.3°C	64%	30.8°C	84%	31.0°C	66%	30.1°C	49%
15:00 pm	26.3°C	81%	26.8°C	60%	27.2°C	77%	27.1°C	58%	26.3°C	78%	26.4°C	61%	27.2°C	42%
HORA	LUNES 29		MARTES 30											
	T°	HR°	T°	HR°										
7:30 am	26.1°C	92%	25.8°C	68%										
12:00 pm	30.7°C	83%	29.8°C	59%										
15:00 pm	26.3°C	75%	26.7°C	52%										

MAYO														
DIA														
HORA			MIERCOLES 1		JUEVES 2		VIERNES 3		SABADO 4		DOMINGO 5			
	T°	HR°	T°	HR°	T°	HR°	T°	HR°	T°	HR°	T°	HR°		
7:30 am			25.9°C	88%	26.8°C	73%	25.6°C	90%	26.4°C	73%	26.1°C	55%		
12:00 pm			30.9°C	84%	30.7°C	64%	29.6°C	84%	31.2°C	68%	30.7°C	48%		
15:00 pm			27.8°C	79%	27.3°C	57%	26.8°C	78%	27.6°C	60%	28.9°C	42%		
HORA	LUNES 6		MARTES 7		MIERCOLES 8		JUEVES 9		VIERNES 10		SABADO 11		DOMINGO 12	
	T°	HR°	T°	HR°	T°	HR°	T°	HR°	T°	HR°	T°	HR°	T°	HR°
7:30 am	26.4°C	93%	26.7°C	67%	25.7°C	85%	26.6°C	65%	25.6°C	92%	26.8°C	68%	26.1°C	50%
12:00 pm	29.0°C	85%	29.2°C	62%	30.6°C	77%	30.2°C	56%	30.8°C	81%	30.0°C	63%	30.3°C	45%
15:00 pm	27.5°C	73%	27.1°C	57%	26.4°C	70%	26.6°C	48%	25.7°C	76%	26.9°C	56%	26.2°C	38%
HORA	LUNES 13		MARTES 14		MIERCOLES 15		JUEVES 16		VIERNES 17		SABADO 18		DOMINGO 19	
	T°	HR°	T°	HR°	T°	HR°	T°	HR°	T°	HR°	T°	HR°	T°	HR°
7:30 am	25.4°C	91%	26.4°C	66%	26.0°C	89%	26.4°C	58%	26.2°C	92%	26.2°C	68%	25.6°C	47%
12:00 pm	31.5°C	86%	29.1°C	55%	31.5°C	73%	31.5°C	52%	29.6°C	84%	30.4°C	63%	31.8°C	43%
15:00 pm	27.8°C	78%	26.9°C	48%	27.8°C	65%	28.3°C	48%	27.0°C	74%	28.2°C	54%	28.1°C	37%
HORA	LUNES 20		MARTES 21		MIERCOLES 22		JUEVES 23		VIERNES 24		SABADO 25		DOMINGO 26	
	T°	HR°	T°	HR°	T°	HR°	T°	HR°	T°	HR°	T°	HR°	T°	HR°
7:30 am	26.2°C	87%	26.4°C	58%	27.4°C	92%	26.4°C	67%	26.2°C	93%	26.5°C	70%	26.6°C	55%
12:00 pm	31.1°C	79%	29.5°C	51%	30.6°C	83%	30.7°C	60%	30.8°C	83%	30.5°C	66%	30.0°C	48%
15:00 pm	28.4°C	65%	28.2°C	47%	26.6°C	76%	27.1°C	56%	26.3°C	78%	27.8°C	60%	27.4°C	41%
HORA	LUNES 27		MARTES 28		MIERCOLES 29		JUEVES 30		VIERNES 31					
	T°	HR°	T°	HR°	T°	HR°	T°	HR°	T°	HR°				
7:30 am	27.0°C	93%	26.5°C	68%	25.4°C	92%	25.9°C	70%	26.6°C	93%				
12:00 pm	30.7°C	82%	30.8°C	61%	29.8°C	83%	29.7°C	66%	30.8°C	87%				
15:00 pm	26.8°C	74%	28.8°C	56%	28.6°C	77%	27.6°C	57%	27.4°C	81%				

JUNIO														
DIA														
HORA									SABADO 1		DOMINGO 2			
	T°		HR°		T°		HR°		T°	HR°	T°	HR°		
7:30 am									26.1°C	72%	25.8°C	54%		
12:00 pm									30.8°C	67%	30.5°C	47%		
15:00 pm									26.3°C	61%	27.7°C	40%		
HORA	LUNES 3		MARTES 4		MIERCOLES 5		JUEVES 6		VIERNES 7		SABADO 8		DOMINGO 9	
	T°	HR°	T°	HR°	T°	HR°	T°	HR°	T°	HR°	T°	HR°	T°	HR°
7:30 am	25.4°C	94%	25.4°C	65%	25.7°C	85%	26.6°C	65%	25.6°C	92%	26.8°C	68%	26.1°C	48%
12:00 pm	28.0°C	85%	30.5°C	60%	30.6°C	77%	30.2°C	56%	30.8°C	81%	30.0°C	63%	30.3°C	43%
15:00 pm	26.5°C	73%	26.4°C	56%	26.4°C	70%	26.6°C	48%	25.7°C	76%	26.9°C	56%	26.2°C	36%
HORA	LUNES 10		MARTES 11		MIERCOLES 12		JUEVES 13		VIERNES 14		SABADO 15		DOMINGO 16	
	T°	HR°	T°	HR°	T°	HR°	T°	HR°	T°	HR°	T°	HR°	T°	HR°
7:30 am	25.4°C	91%	26.3°C	64%	25.0°C	89%	26.4°C	58%	26.2°C	94%	26.2°C	68%	25.6°C	46%
12:00 pm	30.5°C	86%	29.6°C	55%	30.5°C	73%	29.5°C	52%	29.6°C	86%	30.4°C	63%	31.8°C	41%
15:00 pm	26.8°C	78%	27.8°C	47%	28.8°C	65%	27.3°C	48%	27.0°C	75%	28.2°C	54%	28.1°C	34%
HORA	LUNES 17		MARTES 18		MIERCOLES 19		JUEVES 20		VIERNES 21		SABADO 22		DOMINGO 22	
	T°	HR°	T°	HR°	T°	HR°	T°	HR°	T°	HR°	T°	HR°	T°	HR°
7:30 am	26.2°C	89%	25.2°C	56%	25.4°C	92%	25.4°C	65%	26.2°C	95%	26.5°C	70%	26.6°C	52%
12:00 pm	30.2°C	70%	29.6°C	50%	30.6°C	83%	30.8°C	58%	30.8°C	82%	30.5°C	63%	30.0°C	48%
15:00 pm	27.4°C	65%	28.1°C	45%	26.6°C	76%	27.4°C	53%	26.3°C	77%	27.8°C	61%	27.4°C	40%
HORA	LUNES 24		MARTES 25		MIERCOLES 26		JUEVES 27		VIERNES 28		SABADO 29		DOMINGO 30	
	T°	HR°	T°	HR°	T°	HR°	T°	HR°	T°	HR°	T°	HR°	T°	HR°
7:30 am	26.0°C	92%	26.2°C	67%	26.4°C	93%	25.4°C	71%	25.6°C	94%	25.9°C	72%	26.0°C	47%
12:00 pm	29.7°C	80%	30.0°C	60%	29.7°C	83%	29.3°C	65%	29.8°C	88%	29.7°C	67%	30.8°C	39%
15:00 pm	26.2°C	73%	28.2°C	53%	28.2°C	77%	27.1°C	58%	28.4°C	80%	27.6°C	58%	27.4°C	32%

RESULTADOS CLIMATOLÓGICOS: MARZO - JUNIO

MARZO

Durante el mes de marzo, se observaron temperaturas diurnas elevadas con valores máximos que oscilaron entre los 29.5°C y 32.1°C a las 12:00 pm, y temperaturas mínimas en las mañanas que fluctuaron entre 25.2°C y 28.0°C a las 7:30 am. Las temperaturas a las 15:00 pm generalmente estuvieron en el rango de 26.7°C a 29.9°C.

Respecto a la humedad relativa, los valores más altos se presentaron en las mañanas (7:30 am), alcanzando hasta 91%, mientras que los valores más bajos se registraron a las 15:00 pm, descendiendo incluso hasta 36%. Se evidenció una tendencia de descenso progresivo en la humedad relativa vespertina, lo cual puede estar asociado a mayor radiación solar y evaporación durante esas horas.

ABRIL

En abril se observó un ligero descenso térmico respecto a marzo, especialmente en las temperaturas máximas, que variaron entre 29.3°C y 31.8°C al mediodía. Las mínimas matutinas fluctuaron entre 25.0°C y 27.0°C, mientras que a las 15:00 pm los valores oscilaron entre 26.3°C y 29.4°C.

La humedad relativa mantuvo un comportamiento similar al de marzo: alta en las mañanas (hasta 93%) y significativamente más baja en las tardes (mínimo de 31%). Este mes mostró una amplia variabilidad entre días, lo que sugiere cambios en las condiciones atmosféricas locales.

MAYO

Durante mayo, se registraron temperaturas ligeramente más bajas en las mañanas (25.4°C a 27.4°C) y un leve descenso en los valores al mediodía y en la tarde (máximas de 29.0°C a 31.8°C y temperaturas de 26.2°C a 28.9°C a las 15:00 pm). Esta disminución podría deberse a una menor intensidad de radiación solar conforme avanza el otoño.

En cuanto a la humedad relativa, los valores continuaron con la misma tendencia: altos en las mañanas (hasta 94%) y descenso progresivo hacia la tarde (mínimos de 37%-38%). No obstante, se identificaron días con valores más homogéneos, lo que puede estar vinculado a mayor nubosidad o estabilidad atmosférica.

JUNIO

Junio marcó una mayor estabilización térmica con temperaturas mínimas matutinas entre 25.0°C y 27.0°C, y máximas que no superaron los 31.8°C. Se evidenció un leve descenso en las temperaturas promedio, lo que coincide con la transición hacia la estación más fría.

En cuanto a humedad relativa, se registraron valores muy altos en las mañanas (hasta 95%) y bajos en las tardes (mínimos de 32%-34%), reflejando nuevamente un patrón de condiciones más secas en horas de mayor insolación. El comportamiento de la humedad fue más constante y predecible, lo cual podría estar relacionado con menor variabilidad atmosférica y ausencia de lluvias.

TENDENCIAS GENERALES OBSERVADAS

- Existe un patrón cíclico diario claro: altas temperaturas y baja humedad en la tarde; baja temperatura y alta humedad en la mañana.
- Marzo y abril fueron los meses más cálidos, con temperaturas máximas superiores a 31°C en varios días.
- La humedad relativa disminuye progresivamente de marzo a junio en horas de la tarde, lo que sugiere un aumento de la sequedad ambiental, típico del cambio estacional.
- Junio mostró las condiciones más frescas y secas en la tarde, marcando el inicio del periodo seco.











