



Universidad César Vallejo

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

Influencia de Cadmio y la Interacción con Micorrizas sobre la Bioacumulación y Morfología en *Zea mays* L. cultivado en Tarapoto, San Martín.

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

Ingeniero Ambiental

AUTORES:

Guzman Saavedra, Jorge Luis (orcid.org/0000-0002-8408-1498)

Pinedo Ramirez, Victor Fred (orcid.org/0000-0002-1452-4695)

ASESOR:

Dr. Vallejo Torres, Geomar (orcid.org/0000-0001-7084-977X)

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:

Calidad y Gestión de los Recursos Naturales

LÍNEA DE RESPONSABILIDAD SOCIAL UNIVERSITARIA:

Desarrollo sostenible y adaptación al cambio climático

TARAPOTO – PERÚ

2024



UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

Declaratoria de Autenticidad del Asesor

Yo, VALLEJOS TORRES GEOMAR, docente de la FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA de la escuela profesional de INGENIERÍA AMBIENTAL de la UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO SAC - TARAPOTO, asesor de Tesis titulada: Influencia de Cadmio y la Interacción con Micorrizas sobre la Bioacumulación y Morfología en Zea mays L. cultivado en Tarapoto, San Martín., cuyos autores son PINEDO RAMIREZ VICTOR FRED, GUZMAN SAAVEDRA JORGE LUIS, constato que la investigación tiene un índice de similitud de 16.00%, verificable en el reporte de originalidad del programa Turnitin, el cual ha sido realizado sin filtros, ni exclusiones.

He revisado dicho reporte y concluyo que cada una de las coincidencias detectadas no constituyen plagio. A mi leal saber y entender la Tesis cumple con todas las normas para el uso de citas y referencias establecidas por la Universidad César Vallejo.

En tal sentido, asumo la responsabilidad que corresponda ante cualquier falsedad, ocultamiento u omisión tanto de los documentos como de información aportada, por lo cual me someto a lo dispuesto en las normas académicas vigentes de la Universidad César Vallejo.

TARAPOTO, 22 de Julio del 2024

Apellidos y Nombres del Asesor:	Firma
VALLEJOS TORRES GEOMAR DNI: 01162440 ORCID: 0000-0001-7084-977X	Firmado electrónicamente por: GVALLEJOST el 22- 07-2024 21:45:29

Código documento Trilce: TRI - 0830932



Declaratoria de Originalidad de los Autores

Nosotros, GUZMAN SAAVEDRA JORGE LUIS, PINEDO RAMIREZ VICTOR FRED estudiantes de la FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA de la escuela profesional de INGENIERÍA AMBIENTAL de la UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO SAC - TARAPOTO, declaramos bajo juramento que todos los datos e información que acompañan la Tesis titulada: Influencia de Cadmio y la Interacción con Micorrizas sobre la Bioacumulación y Morfología en Zea mays L. cultivado en Tarapoto, San Martín., es de nuestra autoría, por lo tanto, declaramos que la Tesis:

1. No ha sido plagiada ni total, ni parcialmente.
2. Hemos mencionado todas las fuentes empleadas, identificando correctamente toda cita textual o de paráfrasis proveniente de otras fuentes.
3. No ha sido publicada, ni presentada anteriormente para la obtención de otro grado académico o título profesional.
4. Los datos presentados en los resultados no han sido falseados, ni duplicados, ni copiados.

En tal sentido asumimos la responsabilidad que corresponda ante cualquier falsedad, ocultamiento u omisión tanto de los documentos como de la información aportada, por lo cual nos sometemos a lo dispuesto en las normas académicas vigentes de la Universidad César Vallejo.

Nombres y Apellidos	Firma
PINEDO RAMIREZ VICTOR FRED DNI: 71055326 ORCID: 0000-0002-1452-4695	Firmado electrónicamente por: VFPINEDOP el 22-07-2024 20:08:34
GUZMAN SAAVEDRA JORGE LUIS DNI: 74865040 ORCID: 0000-0002-8408-1498	Firmado electrónicamente por: JGUZMANSA11 el 22-07-2024 22:21:37

Código documento Trilce: INV - 1691719

DEDICATORIA

A mi madre, por su amor incondicional y apoyo constante; a mi hermana, cuya guía y conocimientos han iluminado mi camino académico; a mis amigos, por su comprensión y ánimo en los momentos difíciles; y a todos aquellos que creyeron en mí e inspiraron a seguir adelante, esta tesis es un reflejo de su fe y confianza en mi capacidad.

Jorge Luis Guzmán Saavedra

Primeramente, a Dios por apoyarme en toda mi carrera universitaria. También a mis amados padres, Ruth Margot Ramirez Parede y Victor Daniel Pinedo Flores, por enseñarme y prepararme para distintos retos en la vida, les debo a ellos todo lo que soy. A mi hermana, Ruth Marisol Pinedo Ramirez, por ser mi ejemplo de superación a seguir. Y finalmente a mi perrita “preciosa” y a todas las personas que me apoyaron a llegar a donde estoy ahora.

Víctor Fred Pinedo Ramirez

AGRADECIMIENTO

Agradezco profundamente a mis padres, por su amor, paciencia y constante apoyo; a mis profesores y mentores, por su guía y sabiduría que han sido cruciales en mi formación; a mis amigos y compañeros, por su motivación y compañía durante este viaje; y a todas las personas que, con sus consejos, colaboración y comprensión, hicieron posible la realización de esta tesis. Su influencia y ayuda han sido invaluable en este logro.

Jorge Luis Guzmán Saavedra

Primordialmente a Dios, por ser el guía de mi camino y llevarme siempre de su lado. A mis amados padres, agradecerles hoy y siempre por enseñarme cómo afrontar la vida sin estar preparado y como estar preparado para afrontar la vida, todos mis logros son para ellos.

A mi hermana, por darme la motivación de superarme cada día más y lograr superar cualquier adversidad.

Y a mí perrita por ser un apoyo emocional fundamental y a todas las personas que fueron parte de mi proceso universitario y me ayudaron crecer tanto profesional como personalmente.

Víctor Fred Pinedo Ramirez

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Carátula.....	<i>i</i>
Declaratoria de autenticidad del asesor.....	<i>ii</i>
Declaratoria de autenticidad del autor.....	<i>iii</i>
<i>Dedicatoria</i>	<i>iv</i>
<i>Agradecimiento</i>	<i>v</i>
<i>Índice de contenidos</i>	<i>vi</i>
<i>Índice de tablas</i>	<i>vii</i>
<i>Índice de figuras</i>	<i>viii</i>
<i>Resumen</i>	<i>ix</i>
<i>Abstract</i>	<i>x</i>
I. INTRODUCCIÓN	1
II. METODOLOGÍA	12
III. RESULTADOS	24
IV. DISCUSIÓN	37
V. CONCLUSIONES	41
VI. RECOMENDACIONES	42
REFERENCIAS	43
ANEXOS	50

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Análisis de varianza (P-valor) de altura de planta de maíz	24
Tabla 2. Análisis de varianza (P-valor) de diametro de tallo de planta de maíz.....	27
Tabla 3. Análisis de varianza (P-valor) de número de hojas de planta de maíz	29
Tabla 4. Análisis de varianza (P-valor) de análisis de cadmio.....	31
Tabla 5. Análisis de varianza (P-valor) de materia seca foliar y radicular.....	34

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Altura de plantas de maíz con cuatro periodos de evaluación. Colores distintos indica diferentes tratamientos.....	26
Figura 2. Diámetro de tallo de plantas de maíz con cuatro periodos de evaluación. Colores distintos indica diferentes tratamientos.....	28
Figura 3. Número de hojas de plantas de maíz con cuatro periodos de evaluación. Colores distintos indica diferentes tratamientos.....	30
Figura 4. Comparación de medias del análisis de cadmio de la área foliar de maíz.	32
Figura 5. Comparación de medias del análisis de cadmio de la área radicular de maíz.....	33
Figura 6. Comparación de medias de materia seca de la parte foliar de maíz.	35
Figura 7. Comparación de medias de materia seca de la parte radicular de maíz. ...	36

RESUMEN

En el presente estudio se evaluó el efecto del cadmio y las micorrizas en el crecimiento y la bioacumulación de cadmio en plantas de maíz (*Zea mays* L.) cultivadas en la región de Tarapoto, San Martín. Se utilizó un diseño experimental completamente al azar con cuatro tratamientos: sin cadmio ni micorrizas (T1), sin cadmio y con micorrizas (T2), con cadmio y sin micorrizas (T3), y con cadmio y micorrizas (T4). Las plantas se cultivaron en un sustrato de tierra y cascarilla de arroz, y se analizaron parámetros morfológicos (altura, diámetro del tallo, número de hojas) y la concentración de cadmio en raíces y hojas mediante espectroscopía de absorción atómica. Los resultados mostraron que el tratamiento T4 presentó la mayor acumulación de cadmio en raíces (6.3 mg/kg) y hojas (1.1 mg/kg), mientras que los tratamientos sin cadmio (T1 y T2) tuvieron las concentraciones más bajas. En términos de crecimiento, los tratamientos con micorrizas, especialmente T2, promovieron una mayor altura de planta, diámetro de tallo y número de hojas, con T2 alcanzando una altura promedio de 125.9 cm a los 63 días. Sin embargo, la presencia de cadmio en T4 limitó estos beneficios. La prueba de comparación de medias de Tukey reveló diferencias significativas entre los tratamientos en todos los períodos evaluados ($P < 0.05$). En conclusión, aunque las micorrizas demostraron potencial para mejorar el crecimiento y la salud del maíz en suelos contaminados con cadmio, su efectividad para reducir la translocación de cadmio a las hojas fue limitada. Estos hallazgos sugieren que las micorrizas pueden ser una herramienta útil para mitigar la contaminación por cadmio y mejorar la productividad agrícola, aunque es necesario optimizar su aplicación para maximizar sus beneficios en diferentes condiciones de campo.

Palabras Clave: *Zea mays*, Cadmio, Micorrizas

ABSTRACT

In the present study, the effect of cadmium and mycorrhizae on the growth and bioaccumulation of cadmium in maize plants (*Zea mays* L.) cultivated in the Tarapoto region of San Martín was evaluated. A completely randomized experimental design with four treatments was used: without cadmium or mycorrhizae (T1), without cadmium and with mycorrhizae (T2), with cadmium and without mycorrhizae (T3), and with cadmium and mycorrhizae (T4). The plants were grown in a substrate of soil and rice husk, and morphological parameters (height, stem diameter, number of leaves) and cadmium concentration in roots and leaves were analyzed using atomic absorption spectroscopy. The results showed that the T4 treatment presented the highest cadmium accumulation in roots (6.3 mg/kg) and leaves (1.1 mg/kg), while the treatments without cadmium (T1 and T2) had the lowest concentrations. In terms of growth, the treatments with mycorrhizae, especially T2, promoted greater plant height, stem diameter, and number of leaves, with T2 reaching an average height of 125.9 cm at 63 days. However, the presence of cadmium in T4 limited these benefits. The Tukey's multiple comparison test revealed significant differences between treatments in all evaluation periods ($P < 0.05$). In conclusion, although mycorrhizae demonstrated potential to improve the growth and health of maize in cadmium-contaminated soils, their effectiveness in reducing the translocation of cadmium to the leaves was limited. These findings suggest that mycorrhizae can be a useful tool for mitigating cadmium contamination and enhancing agricultural productivity, though it is necessary to optimize their application to maximize their benefits under different field conditions.

Keywords: *Zea mays*, Cadmium, Mycorrhizae

I. INTRODUCCIÓN

El estudio de la influencia del cadmio en los sistemas agrícolas de cultivos de maíz que se encuentran en interacción con las micorrizas es de vital importancia, para de esa manera poder contextualizar la relevancia ecológica y agronómica del suelo como un recurso no renovable, el cual se ha visto que se puede llegar a regenerar una tasa extremadamente lenta de aproximadamente pocos centímetros cada mil años, como destacan Álvarez et al. (2022). Este recurso es crucial no solo para la biodiversidad y la vida humana, sino también como base para la producción agrícola. Sin embargo, actividades humanas como la minería y el uso intensivo de fertilizantes están degradando el suelo, reduciendo la productividad de los cultivos. Esto pone en riesgo a comunidades vulnerables, aumentando la pobreza y los problemas de salud, como trastornos neurológicos y cánceres causados por la contaminación del suelo con sustancias cancerígenas (Berilli et al., 2023; Sarmiento y Febres, 2021; Guo et al., 2021).

El cadmio, un metal pesado el cual no cuenta con un rol biológico esencial, debido a su altamente toxicidad presente incluso en bajas concentraciones, este metal, se encuentra naturalmente en bajas concentraciones en la corteza terrestre, pero se pudo visualizar que sus niveles aumentan de manera significativamente debido a las actividades industriales (IARC, 2021; Rice et al., 2012). Este metal puede acumularse en el maíz, uno de los cultivos fundamentales en Perú, y su ingesta puede incrementar considerablemente la exposición humana al cadmio, con el maíz funcionando como un conductor de cadmio desde el suelo contaminado hasta los consumidores (Hu et al., 2009; Schreiber y Franke, 2001). En respuesta a estos desafíos, las micorrizas arbusculares emergen como aliados biológicos vitales, capaces de alterar las propiedades del suelo y mitigar la bioacumulación de metales pesados gracias a sus mecanismos de inmovilización y absorción (Janeeshma et al., 2020).

Además, la relevancia del maíz para las economías locales se subraya en estudios como el de Chancay y Fienco (2023), que notan la significativa extensión del cultivo en Perú y su importancia para numerosas familias. Sin embargo, la presencia de cadmio y otros metales pesados en estos suelos, exacerbada por prácticas agrícolas y industriales no sostenibles, supone un

riesgo constante para la seguridad alimentaria y la salud pública (Zhao y Naeth, 2022; Poma y Quiñones, 2022).

Esta investigación se centró, por tanto, en caracterizar cómo la interacción del cadmio con las micorrizas afecta la bioacumulación de este metal y la morfogénesis del maíz en San Martín, buscando respuestas a problemas específicos sobre las concentraciones de cadmio que impactan el desarrollo del maíz y cómo las micorrizas pueden mitigar este impacto. La relevancia de este estudio no solo radica en su base social, exponiendo los riesgos para la salud humana, sino también en su potencial para ofrecer alternativas económicas y sostenibles para mejorar la salud del suelo y la eficacia de la agricultura mediante el uso estratégico de micorrizas.

Seguidamente se planteó el **problema general**: ¿Cuál es el impacto del cadmio y su interacción con micorrizas sobre la bioacumulación y morfogénesis en *Zea mays* L. cultivado en Tarapoto, San Martín?, Seguido de los problemas específicos: **PE1**: ¿Cuáles son las concentraciones de cadmio que de manera negativa afectan la morfogénesis de *Zea mays* L.?; **PE2**: ¿Cómo influyen las micorrizas en la acumulación y mitigación del cadmio en *Zea mays* L.?; **PE3**: ¿Qué efectos puede tener el cadmio en las características morfogénicas de *Zea mays* L. mientras hay presencia de colonización micorrízica?

La investigación presenta una **justificación social**, que busca exponer los riesgos ambientales y para la salud humana derivados de la contaminación por cadmio, evidenciando los posibles impactos en los consumidores de los productos agrícolas. La **justificación económica** considera el uso de micorrizas como una alternativa de bajo costo y accesible para la mejora de la salud del suelo y la productividad agrícola. La **justificación metodológica** se basa en el empleo de metodologías avanzadas y guías de campo para evaluar la bioacumulación de metales y la respuesta morfológica de las plantas. La **justificación ambiental** aboga por el uso de prácticas agrícolas que reduzcan la dependencia de químicos, destacando el papel de las micorrizas en la detoxificación del suelo y su contribución a un manejo sostenible de los terrenos cultivables.

El **objetivo general** de la investigación es: determinar los efectos del cadmio y su interacción con micorrizas en la bioacumulación del metal y el desarrollo morfológico de *Zea mays* L. Seguido de los objetivos específicos: **OE1**: Cuantificar los niveles de cadmio en estructuras aéreas y raíz de *Zea mays* L. bajo condiciones de exposición metálica; **OE2**: Investigar la bioacumulación de cadmio en presencia de micorrizas, analizando su capacidad de mitigación y **OE3**: Evaluar las alteraciones morfológicas en *Zea mays* L. asociadas a distintas intensidades de exposición a cadmio y su interacción con la colonización micorrízica.

Finalmente, se estableció las **hipótesis** de investigación: Es probable que el cadmio modifique negativamente la colonización de micorrizas y afecte el desarrollo morfológico de *Zea mays* L. en Tarapoto, San Martín. Continuando con las **hipótesis específicas**: **HE1**: Es probable que las concentraciones elevadas de cadmio perjudiquen la morfología de *Zea mays* L.; **HE2**: Es posible que las micorrizas atenúen los efectos negativos del cadmio en el desarrollo morfológico de *Zea mays* L.; **HE3**: Es probable que el cadmio reduzca la eficiencia de las micorrizas en su rol de apoyo al crecimiento vegetal bajo condiciones de estrés por metales.

Zhao y Naeth (2022), en su artículo de investigación titulado “Enmienda del suelo con una sustancia húmica y hongos micorrízicos arbusculares que mejoran la recuperación de las minas de carbón” el cual fue realizado en Canadá. Tuvieron como objetivo evaluar los efectos de aplicaciones únicas y combinadas de un producto de sustancia húmica llamado nano humus. Su metodología constó en la aplicación de nano humus (150 g/m² en suelos), hongos *micorrízicos arbusculares* (250 g inóculos/m² en suelos) y fertilizantes (37 g/m² en suelos) sobre las características químicas del suelo, los metales pesados del suelo y el crecimiento de la alfalfa (*Medicago ruthenica* L.) y cebada (*Hordeum vulgare* L.). Donde los resultados indican que la utilidad de hongos micorrízicos arbusculares con nano humus mostró mayores efectos en el segundo año. En comparación con los suelos no tratados, aumentaron la posibilidad de intercambio catiónico del suelo en un 38 %, el carbono orgánico total en un 36 %, y el nitrógeno, fósforo

y potasio disponibles entre un 20 y un 92 %; redujeron las acumulaciones de cadmio en el suelo en un 25 % y de arsénico en un 9 %. Los autores concluyeron que las aplicaciones combinadas generalmente proporcionaron mayores beneficios que las aplicaciones únicas, lo que podría ser una práctica útil en sitios de recuperación contaminados con metales pesados

Ma et al. (2022), en su artículo de investigación titulado “Remediación por inmovilización in situ, distribución de agregados del suelo y composición de la comunidad microbiana en suelos débilmente alcalinos contaminados con cadmio: un estudio de campo”, esta investigación fue realizado en China. Tuvieron como objetivo realizar la estabilización química de Cd en suelos débilmente alcalinos y la acumulación de Cd en maíz. Por ello realizaron un experimento de campo para investigar los efectos del biocarbón de cáscara de arroz (CA) (7,5, 15 y 15 t hm⁻²) sobre la disponibilidad de Cd en los suelos y su acumulación en el maíz (*Zea mays* L), la distribución de los agregados del suelo y la comunidad microbiana. Los resultados mostraron que el tratamiento con BC promovió la formación de agregados grandes (5–8 y 2–5 mm) y mejoró la estabilidad de los agregados, mientras que disminuyó la proporción de agregados del suelo ≤0,25 mm. El diámetro medio geométrico y el diámetro medio en peso en suelos tratados con BC aumentaron entre un 9,9 % y un 40,5 % y entre un 3,6 % y un 32,7 %, respectivamente, lo que indica que la firmeza de los agregados del suelo aumentó. Además, CA facilitó la migración de Cd desde partículas grandes (agregados >0,5 mm) a partículas pequeñas (agregados <0,25 mm). Los autores concluyeron que la aplicación de CA disminuyó el ácido dietilentriaminopentaacético, –Cd extraíble entre un 17,6 % y un 32,12 % en comparación con el control.

Yang et al. (2019) exploraron en su estudio "Un método novedoso para eliminar metales pesados del sistema de compostaje: la combinación de bacterias funcionales y materiales adsorbentes" la innovadora técnica de utilizar bacterias funcionales y materiales adsorbentes para eliminar metales pesados del compost. Condujeron su investigación en China, con el objetivo de abordar eficazmente la problemática de los metales pesados en el compostaje. La metodología incluyó la selección de residuos de maíz en polvo, algodón, esponja

y agentes microbianos con afinidad por los metales pesados, empleándolos en diversos tratamientos. Los resultados destacaron la eficacia de la esponja y el algodón en la eliminación del cromo (Cr), con porcentajes de 19,09 % y 26,36 % respectivamente. Además, se observó un notable traslado de metales pesados desde el entorno hacia la columna de adsorbente. Los hallazgos concluyeron que la combinación de bacterias funcionales y materiales adsorbentes demostró ser una estrategia efectiva para descontaminar el compost. Este estudio se considera relevante para la investigación actual debido a su enfoque innovador y sus resultados prometedores, ofreciendo una perspectiva valiosa para mejorar la calidad del suelo en sistemas agrícolas.

Berilli et al. (2023) llevaron a cabo una investigación titulada “Influencia del humus en la absorción de cromo por plántulas de café cultivadas sobre sustrato que contiene lodos de curtiduría” en Brasil, con el fin de examinar cómo el humus podría influir en la absorción de cromo por parte de las plántulas de café, especialmente cuando se cultivan en sustratos que contienen lodos de curtiduría. Su objetivo principal fue determinar si el humus podría actuar como un agente estabilizador de cromo en estas condiciones y qué impacto tendría en el desarrollo y la anatomía de las hojas de las plántulas. Para ello, aplicaron diferentes tratamientos con una dosis fija de lodo de curtiduría en sustratos de plántulas de café, variando las proporciones de humus y subsuelo. La evaluación de la anatomía foliar y el desarrollo de las plántulas se realizó 180 días después de la siembra de los esquejes. Los resultados destacaron que los tratamientos con una mayor proporción de humus promovieron una mayor absorción de cromo por parte de las plantas. Esto, a su vez, afectó la organización de las células epidérmicas y del mesófilo de las hojas, con la observación de una intensa degradación citoplasmática y cambios ultraestructurales en cloroplastos y mitocondrias, así como un aumento de vacuolas autofágicas. Los investigadores concluyeron que, aunque la combinación de humus y lodos de curtiduría mejoró el crecimiento y la calidad de las plántulas de café, también generó alteraciones anatómicas significativas y estrés celular debido al aumento de cromo en los tejidos. Estos hallazgos plantean importantes interrogantes sobre el uso de estos residuos en la propagación de plantas y resaltan la necesidad de considerar cuidadosamente su aplicación en la agricultura.

Sarmiento y Febres (2019) realizaron un estudio de investigación titulado "Remediación de Suelos Contaminados con Plomo (Pb) mediante el Uso de Girasol (*Helianthus Annuus*) y Estiércol de Lombriz Roja (*Eisenia Foetida*) en Condiciones Controladas" en Arequipa. El objetivo principal fue evaluar la eficacia de remediar suelos contaminados con plomo utilizando girasol (*Helianthus annuus*) y estiércol de lombriz (*Eisenia foetida*). Implementaron cuatro tratamientos que incluían suelo contaminado con plomo, estiércol de lombriz y girasol como componentes. Los resultados revelaron que el tratamiento T2 logró reducir significativamente el contenido de plomo en el suelo en un 81,21 %, disminuyendo la concentración inicial de 121,05 mg kg⁻¹ a 22,75 mg kg⁻¹. Además, este tratamiento mejoró la calidad del suelo al incrementar la cantidad de materia orgánica, la capacidad de intercambio catiónico, el pH y los niveles de N, P y K. Como conclusión, el investigador destacó que la aplicación combinada de girasol (*Helianthus annuus*) y estiércol de lombriz roja (*Eisenia foetida*) puede inmovilizar el plomo en el suelo al absorberlo abundantemente a través de las raíces y mediante la percolación en la capa de la rizosfera. Esto reduce la movilidad de los contaminantes y previene su diseminación a las aguas subterráneas.

Munive et al. (2020) realizaron un estudio titulado "Absorción de plomo y cadmio por girasol en suelos contaminados, tratados con enmiendas orgánicas como compost y vermicompost" en Huancayo, Perú, con el propósito de examinar los efectos de las enmiendas orgánicas, específicamente compost y vermicompost. La metodología consistió en el uso de suelos agrícolas de dos localidades, Mantaro y Muqui, del valle del Mantaro, los cuales fueron tratados con girasol y enmiendas orgánicas. Los resultados del estudio revelaron que los valores del Factor de Bioconcentración (FBC) del cadmio (0,53 - 0,66) fueron mayores que los del plomo (0,07 - 0,08), lo que indica una mayor propensión del cadmio a acumularse en las plantas que el plomo, especialmente con el uso de vermicompost (Pb: 1.2 - Cd: 1,4) en comparación con el compost (Pb: 0.8 - Cd: 1.2). Los investigadores concluyeron que la presencia de altos niveles de metales pesados en suelos agrícolas representa un riesgo para los cultivos, ya

que existe evidencia de que estos metales pueden desplazarse hacia las partes comestibles de las plantas.

Yu et al. (2022) llevaron a cabo una investigación titulada "Efectos de la aplicación de bacterias inmovilizadoras de cadmio y fertilizantes orgánicos en *Houttuynia cordata* y comunidades microbianas en un campo contaminado con cadmio" en China. En este estudio, los autores examinaron los efectos de la aplicación conjunta de un agente bacteriano inmovilizador de cadmio y dos fertilizantes orgánicos fermentados (residuos de hongos comestibles fermentativos; estiércol de vaca fermentativo) en *Houttuynia cordata* y sus comunidades microbianas en un campo contaminado con cadmio. La metodología demostró cómo la aplicación combinada de enmiendas del suelo de base biológica y el agente bacteriano redujo efectivamente más del 20 % de la absorción de cadmio por parte de la planta. Además, se observó un aumento significativo en el nivel de nitrógeno del suelo después de la fertilización combinada. En conclusión, los autores resaltaron los efectos beneficiosos del inoculante bacteriano inmovilizador de cadmio en *H. cordata*, al tiempo que proporcionaron una mejor comprensión de los cambios microbianos inducidos por la fertilización combinada utilizando el agente microbiano y enmiendas naturales del suelo.

Li et al. (2019) llevaron a cabo un estudio titulado "Estudio de los cambios morfológicos del cobre y zinc durante el compostaje de estiércol porcino con adición de biocarbón y un agente microbiano" en China. En esta investigación, los autores investigaron los efectos de la adición de biocarbón y un agente microbiano sobre los cambios morfológicos en el cobre y el zinc durante el compostaje. Basándose en el uso de biocarbón y agentes microbianos, lograron resultados significativos, donde el tratamiento T8 inmovilizó exitosamente el 70,36 % del cobre debido a la adición de biocarbón, mientras que el tratamiento T3 inmovilizó exitosamente el 40,76 % del zinc. Se descubrió que la transformación del zinc a un estado estable superior está estrechamente relacionada con la formación de ácidos fúlvicos y húmicos. Los resultados del análisis del espectro de fluorescencia también corroboraron que la conversión

de cobre y zinc a formas con mayor estabilidad se asoció con la formación de sustancias similares a los ácidos fúlvicos y húmicos.

Lozano y Suárez (2022) llevaron a cabo un trabajo de investigación titulado "Remediación del suelo del cultivo de arroz, con dolomita y humus, Cacatachi, 2022" en Cacatachi, San Martín. El objetivo fue evaluar la remediación del suelo del cultivo de arroz mediante la aplicación de dolomita y humus. El estudio incluyó una población de 176 plantas de arroz, de las cuales se seleccionó una muestra aleatoria de 48 plantas. Estas se distribuyeron en cuatro parcelas de 4 m² cada una. Los resultados mostraron que la aplicación de dolomita y humus logró reducir los niveles de metales pesados en el suelo de cultivo de arroz. Específicamente, los niveles de arsénico (As), cromo (Cr) y plomo (Pb) disminuyeron a 9,23 mg kg⁻¹, 0,071 mg kg⁻¹ y 56,23 mg kg⁻¹, respectivamente, valores por debajo de los permitidos por los Estándares de Calidad Ambiental (ECAs) para suelos agrícolas. Además, se observó que la aplicación de dolomita y humus tuvo un impacto positivo en el crecimiento y desarrollo de las plantas de arroz. Las plantas tratadas alcanzaron mayores alturas, anchos de hojas, números de hojas y tallos, así como una menor infestación de insectos por planta en comparación con las no tratadas. En conclusión, el estudio sugiere que el uso de dolomita y humus constituye una estrategia efectiva para remediar suelos de cultivo de arroz contaminados con metales pesados, lo que podría mejorar tanto la calidad del suelo como el rendimiento del cultivo.

Sapaico (2020) llevó a cabo un trabajo de investigación titulado "Impacto de la cal, materia orgánica y microorganismos eficaces en el contenido de cadmio de un suelo contaminado en el centro poblado de Huancaní, distrito de Leonor Ordoñez, provincia de Jauja – 2019" con el propósito principal de analizar cómo la cal, los microorganismos eficaces y la materia orgánica influyen en el contenido de cadmio en un suelo contaminado en Huancaní. Para ello, se utilizó CaCO₃ como fuente de cal en concentraciones de 0 y 1 g.kg⁻¹; estiércol de lombriz (EL) como parte de materia orgánica, con un nivel de 0 y 20 %; y microorganismos eficaces (ME) inoculados en el suelo en concentraciones de 0 y 20 %. Los tratamientos se dispusieron en un diseño experimental completamente al azar con un arreglo factorial 2x2x2 y se replicaron tres veces. La evaluación se realizó tras un periodo de incubación del suelo a 25°C durante

2 meses, manteniendo la humedad al nivel de capacidad de campo. Cada ensayo experimental consistió en 200 g de tierra fina seca al aire (TFSA), dispuestos en un vaso de precipitación. Los resultados mostraron que las concentraciones de 1 g.kg⁻¹ de cal y 20 % de materia orgánica redujeron significativamente la presencia de Cd en el suelo en un 8,37 % y 10,96 %, respectivamente. Se concluyó que la cal y la materia orgánica son efectivas para remediar suelos contaminados con cadmio, mientras que los microorganismos eficaces no mostraron un impacto significativo en la disminución de la concentración de Cd.

Contaminación de suelos, es aquel que ha sido alterado por la presencia de sustancias químicas peligrosas de origen humano. Estas sustancias generan posibles efectos negativos en el medio ambiente y el bienestar de la salud humana. (Li et al., 2019).

Las principales fuentes antropogénicas se pueden clasificar en tres categorías: agrícolas, industriales y mineras. Los metales pesados pueden ingresar al suelo agrícola a través de la deposición atmosférica, que ocurre después de su liberación a la atmósfera por actividades como la quema de combustibles fósiles, la incineración de residuos o la fabricación de cemento. Además, la escorrentía contaminada con metales pesados provenientes de la minería y la industria puede llegar a los cursos de agua y eventualmente alcanzar tierras agrícolas. El uso de microorganismos beneficiosos puede promover el crecimiento y la morfología de los cultivos, incluso en presencia de metales pesados como el cadmio.

Los niveles de cadmio (Cd) de los cultivos alimentarios pueden elevarse mediante actividades de gestión y factores geogénicos. Si bien se pone énfasis en reducir el Cd en los fertilizantes con fósforo (P), cada vez hay más evidencia que muestra que la acumulación de Cd en las plantas está marcadamente influenciada por los hongos micorrízicos arbusculares (HMA). Las micorrizas son muy útiles para reducir el amontonamiento de Cd en los brotes a través de varios mecanismos, incluida la inmovilización de Cd en estructuras fúngicas y el aumento de la absorción de zinc.

Los microorganismos asociados a las raíces (HMA) desempeñan un papel crucial en la fisiología de la planta, influyendo en aspectos como la biomasa radicular, la estabilidad osmótica, el contenido mineral, la producción de clorofila, la conductancia estomática, las tasas de fotosíntesis y respiración, así como en las actividades antioxidantes (Pedranzani et al., 2016).

Los efectos provocados por estos microorganismos asociados a las raíces (HMA) en las plantas incluyen un incremento en su contenido nutricional y un crecimiento acelerado (Jabborova et al., 2021). De manera similar, diversos estudios han concluido que las micorrizas, tanto de forma individual como en combinación con otros microorganismos, podrían ser utilizadas en la agricultura para mejorar el rendimiento de los cultivos al alterar la fisiología de las plantas, lo que se refleja en parámetros como altura, número de hojas y desarrollo radicular (Mathur y Sharma, 2018). Investigaciones recientes sobre el impacto de los HMA en la fisiología de diferentes cultivos han evidenciado que estos desempeñan un papel significativo en el aumento de la concentración de clorofila, carotenoides, nutrientes, fitohormonas, antioxidantes, SOD y peroxidasas, lo que en última instancia afecta el metabolismo global de las plantas y se traduce en mayores rendimientos en los cultivos estudiados (Jabborova, 2022).

Además, un suelo fértil se caracteriza por estar estabilizado y puede interactuar directamente con las raíces de las plantas, emitiendo el característico aroma de tierra húmeda (Murillo et al., 2019). Este suelo contiene una gran cantidad de microorganismos, con millones de ellos por cada gramo de suelo, una cantidad mucho mayor que la presente en el compost convencional. Esta abundancia de microorganismos es la responsable de las propiedades distintivas del suelo fértil (Álvarez et al., 2022).

Por esta razón, los microorganismos eficientes, tales como las micorrizas, representan una amplia diversidad microbiana que incluye bacterias ácido-lácticas, bacterias fotosintéticas, levaduras, actinomicetos y hongos filamentosos con actividad fermentativa (Tanya y Leiva, 2019). Estos microorganismos tienen numerosas aplicaciones en el ámbito agrícola, ya que desempeñan funciones

clave como favorecer la germinación de semillas, potencian la floración, estimulan el crecimiento y desarrollo de los frutos, incrementan la biomasa y aseguran una reproducción exitosa en las plantas. Además, mejoran la estructura física del suelo, aumentan su fertilidad química y suprimen la presencia de enfermedades (Oyarce y Rodríguez, 2021). También promueven la acción fotosintética, mejoran la absorción de agua y nutrientes en las plantas, y reducen los tiempos de maduración de abonos orgánicos (Alarcón et al., 2020).

El cultivo del maíz es una actividad que requiere tiempo, atención y cuidados para que la planta crezca sana y productiva (Jaques et al., 2022). En frecuencia el maíz se realiza a una profundidad de entre 3 y 5 centímetros, en surcos separados entre sí por una distancia que varía en función del tipo de cosechadora, las preferencias regionales y el uso final del maíz (Martínez et al., 2020).

(Chancay y Fienco, 2023), menciona que el maíz (*Zea mays*) está clasificado como un cereal que forma parte de la familia de Gramíneas o Poáceas, siendo una planta gramínea de origen americano. Se caracteriza por sus tallos largos y sólidos, a diferencia de sus parientes más cercanos que poseen tallos huecos. Las espigas o mazorcas, que son inflorescencias femeninas, se desarrollan al final de estos tallos, albergando en su eje las semillas o granos de maíz. Este cultivo es reconocido como uno de los granos alimenticios más antiguos, habiendo sido domesticado y demostrando una alta productividad. Es importante señalar que el maíz no crece de forma silvestre y depende completamente de los cuidados humanos para su desarrollo.

En cuanto a las **características fenológicas del maíz**, se refiere a la medida de su crecimiento de manera vegetativa y su reproductividad manifestando en función de los cambios fisiológicos de la planta y morfológicos, asociados con el ambiente, estas están comprendidas en altura, número de hojas, grosor de tallo y color (Jaques et al., 2022).

II. METODOLOGÍA

2.1. Tipo y diseño de investigación

2.1.1. Tipo de Investigación:

Este estudio es de tipo investigación aplicada, fundamentado en las directrices establecidas por Castro et al., 2023. Se concentró en abordar y responder a interrogantes específicas sobre el impacto adverso del cadmio en suelos utilizados para el cultivo de maíz. El principal objetivo fue desarrollar estrategias prácticas y efectivas que utilicen micorrizas para mitigar la contaminación por metales pesados. Al explorar soluciones biotecnológicas, esta investigación se ha dedicado a identificar métodos efectivos para reducir la acumulación de cadmio, mejorando así la seguridad y la productividad de los cultivos afectados. Mediante la aplicación práctica de los resultados obtenidos, se pretende generar un conocimiento que tenga aplicaciones directas en la resolución de este problema ambiental específico, contribuyendo significativamente a la sostenibilidad agrícola y la salud del ecosistema.

2.1.2. Diseño de investigación:

En esta investigación, se desarrolló un diseño experimental DCA con cuatro tratamientos y 3 repeticiones, inspirado en las directrices metodológicas propuestas por Fernández en 2020. Esta metodología implica alteraciones controladas de variables específicas: las dosis de cadmio y la introducción de micorrizas en el entorno de cultivo del maíz. Este procedimiento nos permitió examinar detalladamente cómo estos factores afectan tanto la acumulación de metales en las plantas como sus características morfológicas. Para asegurar la integridad y precisión de nuestros hallazgos, los sujetos de estudio, es decir, las plantas de maíz se dividieron en grupos de control y experimentales de manera aleatoria. Esta división estratégica nos permitió medir con precisión los impactos directos de las variables manipuladas sobre las respuestas observadas en las plantas, proporcionando datos fundamentales para validar nuestras hipótesis

2.2. Variables y operacionalización

La matriz de operacionalización se detalla en Anexos 1

Variable independiente: Concentración de cadmio e inoculación de micorrizas (Producto Myco Grow: 3 especies endomicorrizas y 5 especies ectomicorrizas).

Definición conceptual: Investigaciones anteriores han demostrado que la simbiosis entre hongos micorrízicos y plantas puede reducir la transferencia de metales pesados a través del sistema radicular, ofreciendo un método biotecnológico prometedor para mitigar la contaminación en sistemas agrícolas (Li et al., 2019).

Definición operacional: Se evaluó los impactos de distintas concentraciones de cadmio y la inoculación de Micorriza (Myco Grow) en muestras de maíz cultivadas en condiciones controladas en Tarapoto, San Martín.

Dimensiones: Niveles de cadmio y colonización micorrízica.

Indicadores: Cadmio (0 y 3 mg kg⁻¹) y Micorrizas (0 y 2 gr Myco Grow).

Escala: Razón.

Variable dependiente: Acumulación de cadmio en *Zea mays* L. y efectos de Micorriza (Myco Grow) en el suelo.

Definición conceptual:

Las plantas, en su interacción con el medio ambiente, absorben metales pesados principalmente a través de estructuras especializadas como los pelos radiculares y mediante la permeabilidad selectiva de las paredes celulares. Estos compuestos se acumulan en los tejidos vegetales debido a su afinidad por los grupos con carga iónica negativa presentes en las células. Según Ghani et al. (2010), la presencia de metales como el plomo, el arsénico y el cadmio en el sustrato puede inducir severas alteraciones

en la composición celular de las plantas. Estos cambios incluyen, pero no se limitan a, la interferencia en el proceso de fotosíntesis, que es vital para la producción de energía y biomasa en las plantas. Además, la toxicidad de estos metales pesados provoca alteraciones morfológicas significativas que afectan la funcionalidad celular, tales como reducción del crecimiento, decoloración foliar, necrosis celular y alteraciones en la regulación del equilibrio hídrico y de nutrientes. Estas modificaciones no solo comprometen la salud vegetal, sino que también pueden influir en la biodiversidad del ecosistema y en la calidad de los cultivos destinados al consumo humano.

Definición operacional: Se realizó análisis de cadmio en raíces, y tejidos vegetales de *Zea mays* L. después de aplicar tratamientos con Micorriza (Myco Grow).

Dimensiones: Niveles de cadmio y efectos micorrízicos.

Indicadores: Altura de planta, diámetro de tallo, Número de hojas y Cadmio en raíces y tejidos vegetales.

Escala: Intervalo.

2.3. Población, muestra y muestreo

Población: La población de este estudio estuvo compuesta por 36 cultivos de Maíz (*Zea mays* L.) situados en la región, San Martín en un vivero de las cuales 18 fueron expuestos a la contaminación con cadmio. Se seleccionó esta configuración para simular y estudiar de manera controlada los efectos del cadmio y la aplicación de micorrizas en un entorno que replicara las condiciones reales de cultivo. Según Taherdoost (2016), una población se define como una colección de elementos, ya sea infinita o finita, con características comunes. Las inferencias extraídas de este grupo son lo suficientemente amplias para ser consideradas en un estudio.

Muestra: La muestra constará de 36 plantas de maíz, cultivadas en macetas bajo condiciones adecuadas que puedan asegurar una buena semejanza entre todos nuestros tratamientos, los cuales estarán divididos en cuatro grupos para poder evaluar los efectos combinados de nuestras dos variables principales: la concentración de cadmio y la dosis de micorrizas. Las concentraciones de cadmio serán de 0 mg kg⁻¹ y 3 mg kg⁻¹, mientras que las dosis de micorrizas serán de 0 gramos y 2 gramos. Esto resultará en cuatro combinaciones experimentales; Tratamiento 1 (T1): sin cadmio ni micorrizas, T2: sin cadmio con 2 gramos de micorrizas, T3: 3 mg kg⁻¹ de cadmio sin micorrizas, y T4: 3 mg kg⁻¹ de cadmio con 2 gramos de micorrizas. Combinando 9 plantas (Unidades experimentales) por cada combinación, proporcionando un tamaño de muestra significativo para cada tratamiento para detectar diferencias estadísticamente significativas.

Muestreo: Para la selección de las plantas que formarán parte del estudio, se utilizó un método de muestreo aleatorio simple. Este enfoque garantiza que cada planta dentro del grupo asignado tenga la misma probabilidad de selección, lo que es esencial para la validez de los resultados y ayuda a evitar sesgos que puedan afectar la interpretación de los efectos de las intervenciones. Taherdoost (2016) indica que una muestra probabilística se define como aquella en la cual cada elemento tiene una probabilidad conocida de ser incluido, formando parte de una muestra que representa a una población establecida.

Unidad de análisis: En este estudio, cada una de las 36 plantas de maíz sirve como una unidad de análisis individual, distribuidas equitativamente en cuatro grupos de tratamiento distintos. Para asegurar la confiabilidad de los resultados, cada tratamiento se replicó nueve veces (9 repeticiones), y de cada tratamiento, tres plantas fueron seleccionadas aleatoriamente para análisis bioquímico en laboratorio, centrados en medir la acumulación de cadmio en raíces y tejidos aéreos. Además, se realizó evaluaciones morfológicas exhaustivas en todas las plantas logrando documentar cambios en altura, diámetro del tallo, número de

hojas, facilitando un análisis comparativo detallado entre los tratamientos para determinar el impacto del cadmio y las micorrizas en el crecimiento y desarrollo del cultivo de maíz.

2.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

2.4.1. Técnicas de recolección de datos

2.4.1.1. Análisis documental:

Se reviso exhaustivamente documentos y literatura relevante, incluyendo estudios previos sobre los efectos del cadmio en plantas y el uso de micorrizas en la mitigación de metales pesados. Esta revisión ayudo a complementar los datos recogidos y proporciono un marco teórico sólido para interpretar los resultados experimentales.

2.4.1.2. Técnica de muestreo:

Comprende el muestreo de suelo siguiendo protocolos de Brady y Weil (2016), muestreo morfológico basado en las directrices de Booth (2015) y las muestras para análisis de metales pesados se prepararon y analizaron según Lindsay y Norvell (1978) en el laboratorio certificado del ICT.

2.4.2. Instrumento de recolección de datos

2.4.2.1. Ficha de recolección de datos:

Esta ficha recolecto datos de altura de la planta, diámetro del tallo, número de hojas. También se determinó los niveles de cadmio y la caracterización fisicoquímica del suelo como sustrato, proporcionando información esencial sobre la acumulación de metales en los tejidos vegetales que fueron analizados en laboratorio del ICT.

2.5. Procedimiento.

2.5.1. Elaboración de proyecto:

La elaboración del proyecto se sustentó en una extensa revisión de literatura académica, abarcando publicaciones científicas y artículos de revistas especializadas en bioacumulación de metales pesados y su manejo mediante prácticas agronómicas sostenibles. Esta fase inicial fue complementada con consultas dirigidas a expertos en el campo de

toxicología ambiental y micorrizas, lo que facilitó la creación de un marco metodológico para la recolección y análisis de datos. Este enfoque aseguró la integración de perspectivas científicas avanzadas y prácticas innovadoras en nuestro protocolo experimental, con el propósito de evaluar con precisión la interacción entre el cadmio y las micorrizas en el desarrollo del maíz, y su potencial mitigación mediante técnicas de bioingeniería vegetal.

2.5.2. Instalación de trabajo experimental:

2.5.2.1. Construcción de vivero

Para el desarrollo de nuestro trabajo experimental, se ha diseñado y construido un vivero temporal de madera que mide 8 metros de ancho y 12 metros de largo. Esta estructura estuvo cubierta con plástico translúcido, seleccionado por su capacidad para filtrar la luz solar adecuadamente, protegiendo las plantas de condiciones meteorológicas adversas y plagas. Adicionalmente, el vivero estuvo equipado con malla raschel al 50%, que proporciona una sombra óptima y ayuda a regular la temperatura y la exposición solar directa, condiciones cruciales para el estudio de la bioacumulación de metales pesados. Los marcos de madera del vivero no solo brindan soporte estructural y duradero, sino que también se integran estéticamente con el entorno natural, facilitando un ambiente controlado y seguro para el cultivo experimental de maíz y la evaluación de la interacción entre el cadmio y las micorrizas.

2.5.2.2. Preparación de Sustratos

Para el estudio, se seleccionó un sustrato compuesto por una mezcla de tierra y cascarilla de arroz en una proporción de 3:1. La tierra fue elegida debido a su capacidad para retener agua sin compactarse, proporcionando un entorno de crecimiento aireado y ligeramente ácido, esta fue previamente esterilizada en horno a 200 °C. La cascarilla de arroz, importante para incrementar la porosidad del sustrato, facilitó un mejor drenaje y evitó la acumulación excesiva de humedad que podría haber afectado negativamente la salud de las raíces, su desinfección se

realizó con agua hervida a 100 °C. Esta combinación demostró ser especialmente eficaz para controlar con precisión la disponibilidad de cadmio y otros nutrientes en el sustrato, permitiendo una evaluación más clara del efecto de las variables manipuladas sobre el crecimiento de las plantas (Smith, 2015).

2.5.2.3. Muestreo de suelo

En cuanto al muestreo de suelo, se aplicaron los protocolos estandarizados propuestos por Brady y Weil (2016) en "The Nature and Properties of Soils". Esta metodología implicó tomar muestras uniformes del sustrato y seguir un patrón sistemático para minimizar las variaciones espaciales. Este proceso incluyó una mezcla homogénea del sustrato para asegurar una distribución uniforme de las condiciones del suelo. Se tomaron muestras aleatorias de varias macetas hasta lograr 1 kg, lo que garantizó que los datos recolectados reflejaran de manera precisa las condiciones experimentales y los resultados de la investigación.

2.5.2.4. Contaminación de sustrato

2.5.2.5. Cálculo de la Cantidad de CdCl₂ Necesaria para la Solución Madre:

Para alcanzar una concentración de 3 mg/kg de cadmio en cada maceta, y considerando que cada maceta tiene una capacidad de sustrato de 5 kg, la cantidad total de cadmio requerido para todas las macetas es:

$$3 \frac{mg}{kg} \times 5 \text{ kg/maceta} \times 18 \text{ macetas} = 270 \text{ mg de cadmio}$$

Dado que el peso molecular de Cd es 112.41 g/mol y el de CdCl₂ es 183.32 g/mol, la proporción de cadmio en CdCl₂ es:

$$Cd \text{ en } CdCl_2 = \frac{112.41 \frac{g}{mol}}{183.32 \frac{g}{mol}} \approx 0.613$$

Por lo tanto, la cantidad de CdCl₂ necesaria para obtener 270 mg de cadmio es:

$$Cantidad \text{ de } CdCl_2 = \frac{270 \text{ mg}}{0.613} \approx 440.46 \text{ mg}$$

2.5.2.6. Preparación de la Solución Madre

Pesar 440.46 mg de CdCl₂: Pesar cuidadosamente 440.46 mg de CdCl₂ para garantizar la precisión.

Disolución en 2 Litros de Agua: Disolver los 440.46 mg de CdCl₂ en 2 litros de agua destilada para formar la solución madre. Esta concentración asegura que la cantidad de cadmio distribuida en cada maceta sea la adecuada.

2.5.2.7. Dilución para Aplicación en Cada Maceta:

Cada maceta tiene una capacidad de campo de 1.2 litros. Por lo tanto, para garantizar una distribución uniforme del cadmio:

- **Dado que la solución madre contiene un total de 270 mg de cadmio en 2 litros, cada litro contiene 135 mg de cadmio.**
- **Sin embargo, dado que cada maceta solo necesito 15 mg de cadmio (3 mg/kg × 5 kg), se calculó la proporción adecuada de solución madre a diluir en cada maceta para alcanzar esta concentración.**

$$\text{Solución madre por maceta} = \frac{15 \text{ mg}}{135 \text{ mg/l}} \approx 0.111 \text{ litros}$$

- **Por lo tanto, se diluyo en una probeta aproximadamente 111 ml de la solución madre y se igualo a 1.2 litros lo que fue aplicado al sustrato de cada maceta.**

2.5.2.8. Aplicación de la Solución

Se mezclo cuidadosamente los 111 ml de la solución madre con agua adicional hasta alcanzar 1.2 litros. Esta mezcla se aplicó uniformemente al sustrato en cada maceta para garantizar que el cadmio se distribuya homogéneamente a lo largo del sustrato. Este sustrato se dejó reposar por 7 días.

2.5.2.9. Proceso de germinación y siembra de maíz.

La germinación se inició sumergiendo las semillas de *Zea mays* L. en agua destilada estéril para activar su metabolismo. Posteriormente, se trasladaron a bandejas de germinación que contenían papel germinador húmedo, manteniendo las condiciones de humedad y temperatura constantes. A las 48 horas, cuando las semillas emitieron radículas, se

trasladaron con cuidado a las macetas preparadas previamente con el sustrato contaminado con cadmio y sin contaminante. Cada plántula se plantó a la misma profundidad y bajo las mismas condiciones de luz y temperatura para garantizar la uniformidad del tratamiento a lo largo del estudio.

2.5.2.10. Inoculación de micorrizas.

La inoculación de micorrizas se realizó 15 días después de haber sembrado el maíz, utilizando el inóculo comercial Myco Grow, que se compone principalmente de endomicorrizas y ectomicorrizas. La dosis aplicada fue de 2 gramos por maceta, siguiendo las recomendaciones del fabricante para garantizar la formación de una red simbiótica efectiva entre las raíces del maíz y los hongos micorrízicos. Esta dosis fue aplicada directamente sobre el sustrato bajo condiciones estériles para evitar la contaminación por patógenos y asegurar la viabilidad de las esporas, contribuyendo así al establecimiento y desarrollo óptimo de las micorrizas en el contexto experimental. La inoculación se realizará bajo condiciones estériles para evitar la introducción de patógenos y asegurar la viabilidad de las esporas (Miller y Jastrow, 1992).

2.5.3. Evaluación morfológica.

Durante el ciclo de crecimiento, se realizaron evaluaciones detalladas de las características morfológicas de las plantas, incluyendo mediciones de la altura, el número de hojas y el diámetro del tallo en intervalos de 15 días. Estas mediciones, llevadas a cabo con herramientas calibradas como cintas métricas para la altura y calibradores digitales para el diámetro del tallo, permitieron un seguimiento preciso del desarrollo vegetativo y la detección temprana de cualquier signo de estrés fitotóxico o deficiencias nutricionales causadas por la presencia de cadmio o la actividad de las micorrizas. Siguiendo las directrices establecidas por Booth en "Methods in Plant Ecology" (2015), el muestreo de datos morfológicos se realizó con una precisión óptima, lo que no solo proporcionó datos sobre el crecimiento y desarrollo de las plantas bajo diversas condiciones de tratamiento, sino que también facilitó la identificación de posibles efectos fitotóxicos del cadmio en las plantas.

2.5.4. Extracción de plantas de maíz.

Al concluir el experimento, las plantas fueron extraídas manualmente del sustrato con especial cuidado para preservar intactas tanto las partes aéreas como las raíces. Este procedimiento se realizó en un ambiente controlado para prevenir la contaminación cruzada y evitar daños a las muestras. Cada planta fue cuidadosamente lavada con agua destilada para eliminar cualquier residuo de sustrato adherido a las raíces, asegurando así su adecuada preparación para los análisis subsiguientes. Este lavado meticuloso fue crucial para facilitar los análisis de biomasa y la determinación de metales pesados, permitiendo obtener resultados precisos y fiables sobre la acumulación de estos contaminantes en las plantas, según los métodos establecidos por Henderson y Perry (2006).

2.5.5. Materia seca

De las 36 plantas de maíz se eligieron 3 plantas por tratamiento, resultando en un total de 12 muestras para su pesado y análisis posterior. En el marco de nuestro estudio, se procedió a la determinación del peso seco de las muestras vegetales siguiendo métodos rigurosos para asegurar la exactitud en las mediciones. Inmediatamente después de su extracción, las plantas fueron pesadas para obtener su peso fresco utilizando una balanza de alta precisión. Posteriormente, las muestras se trasladaron a una estufa de secado preconfigurada a 70°C y permanecieron allí hasta alcanzar un peso constante, asegurando la completa eliminación de la humedad. Este proceso de secado es esencial para obtener la biomasa seca, que es un indicador clave de la productividad de la planta y su respuesta al estrés inducido tanto por el cadmio como por la colonización micorrízica. Estas evaluaciones meticulosas permitieron determinaciones exactas del contenido de agua y la biomasa seca, conforme a los procedimientos descritos por Henderson y Perry en "Plant Analysis Handbook" (2006). Este enfoque metódico garantizó la precisión y la confiabilidad de los datos, fundamentales para la evaluación del impacto ambiental y la respuesta biológica en el estudio.

2.5.6. Trituración de muestra y etiquetado.

Después del proceso de secado, cada planta fue dividida en parte radicular y área, lo que fue triturado utilizando un molino de laboratorio

para producir un polvo fino y homogéneo, lo cual facilitó los análisis químicos subsiguientes. Cada muestra triturada, tanto de la parte aérea como radicular, fue meticulosamente etiquetada, incluyendo información detallada sobre el tratamiento aplicado, la fecha de recolección, las condiciones de almacenamiento, y las repeticiones específicas del experimento. Esta rigurosa documentación fue crucial para mantener la integridad de los datos, asegurando la trazabilidad y reproducibilidad en los análisis posteriores, conforme a las prácticas recomendadas por Lindsay y Norvell en 1978. Este cuidadoso procedimiento garantizó que cada paso del proceso se llevara a cabo bajo condiciones que preservaran la validez y fiabilidad de los resultados obtenidos en la investigación, permitiendo una evaluación precisa de las diferencias entre las partes radiculares y aéreas de las plantas.

2.5.7. Análisis de tejido vegetal.

Las muestras designadas para la determinación de las concentraciones de cadmio fueron preparadas y analizadas siguiendo las técnicas de digestión ácida y espectroscopía de absorción atómica, recomendadas por Lindsay y Norvell (1978) en su estudio "Development of a DTPA Soil Test for Zinc, Iron, Manganese, and Copper". Este análisis se llevó a cabo en el laboratorio del ICT, aprovechando su certificación de INACAL y equipos de última generación para garantizar mediciones de alta precisión de los niveles de cadmio en las raíces y la parte aérea de las plantas. Esta información fue vital para comprender la dinámica de la absorción y translocación de cadmio en el cultivo de maíz, permitiendo evaluar así la efectividad de las micorrizas en la mitigación de la bioacumulación de metales pesados.

2.6. Métodos de análisis de datos.

2.6.1. Análisis Descriptivo.

El análisis descriptivo en este estudio se enfocó en proporcionar una comprensión clara y detallada de las tendencias centrales y la dispersión de los datos recogidos. Este análisis inicial fue importante para establecer una base sólida para interpretaciones estadísticas más complejas. Se incluyó el cálculo de medias aritméticas, ofreciendo una visión del

rendimiento promedio de las plantas de maíz bajo diferentes condiciones de tratamiento. Las desviaciones estándar se calcularon para evaluar la variabilidad en los datos, proporcionando una indicación de cuán dispersos estaban los datos alrededor de la media. Estas herramientas descriptivas fueron esenciales para evaluar la calidad de los datos y garantizar que las inferencias estadísticas fueran válidas y confiables, según Zar (2010).

2.6.2. Análisis Inferencial

Pruebas de ANOVA.

Análisis Inferencial se realizaron pruebas de ANOVA. Para las pruebas inferenciales, el Análisis de Varianza (ANOVA) de dos vías se implementó para investigar los efectos principales de las concentraciones de cadmio y la aplicación de micorrizas, así como la interacción entre estos dos factores. El ANOVA de dos vías fue ideal para este propósito porque permitió evaluar simultáneamente cómo cada factor y sus combinaciones afectaron la respuesta de las plantas, abordando las preguntas específicas planteadas en las hipótesis del estudio.

Comparaciones de Medias.

Una vez que el ANOVA indicó diferencias significativas, se procedió a realizar comparaciones post hoc para identificar entre qué grupos existían estas diferencias. Para este estudio, se utilizó la prueba de Tukey Honest Significant Difference (HSD). Esta prueba es ampliamente reconocida por la comparación de medias entre múltiples grupos, controlando eficazmente la tasa de error tipo I.

La selección de este método se basa en su capacidad para proporcionar una comparación exhaustiva y equitativa de todas las combinaciones de tratamientos, lo cual es importante en experimentos con diseño factorial donde las interacciones pueden ser tan informativas como los efectos principales (Montgomery, 2013).

2.7. Aspectos éticos.

En este estudio se cumplió rigurosamente con los principios éticos establecidos por el código de ética de la Universidad César Vallejo. La

integridad y responsabilidad marcaron el manejo de la información proveniente de fuentes académicas confiables como Scopus, ScienceDirect y sitios web autorizados. Se observó una estricta adherencia a las normas ISO 690, asegurando una correcta citación de las fuentes utilizadas. Además, se empleó el software Turnitin para verificar la originalidad del contenido y reducir similitudes, garantizando así la autenticidad del trabajo de investigación. Este enfoque ético enfatizó la importancia de la integridad académica y la transparencia en el tratamiento de los datos. La responsabilidad social del estudio fue crítica, especialmente en investigaciones que abordaron la bioacumulación de metales pesados en cultivos agrícolas, destacando así su significativo y constructivo impacto tanto en la comunidad científica como en la sociedad en general.

III. RESULTADOS

En la **Tabla 1**, se presenta el análisis de varianza (P-valor) de la altura de la planta de maíz en diferentes períodos de evaluación (22, 37, 51 y 63 días). Los resultados muestran diferencias significativas en la altura de las plantas debido a la presencia de cadmio y al tratamiento con micorrizas en todos los períodos evaluados. A los 22 días, se observó una significancia para el cadmio ($P < 0.001430$) y el tratamiento general ($P < 0.000984$); a los 37 días, el cadmio ($P < 0.03239$) y el tratamiento general ($P < 0.00659$) continuaron siendo significativos; a los 51 días, se mantuvieron las diferencias significativas para el cadmio ($P < 0.03374$) y el tratamiento general ($P < 0.00734$); y a los 63 días, las diferencias permanecieron significativas con el cadmio ($P < 0.00196$) y el tratamiento general ($P < 0.00368$), indicando una influencia constante de estas variables en el crecimiento de las plantas de maíz a lo largo del tiempo.

Tabla 1. Análisis de varianza (P-valor) de altura de planta de maíz

F.V.	G.L	P-valor de altura de planta (cm)			
		22 días	37 días	51 días	63 días
Cadmio	1	0.001430 **	0.03239 *	0.03374 *	0.00196 **
Micorrizas	1	0.342092	0.24207	0.05149 .	0.00250 **
Tratamiento	1	0.000984 ***	0.00659 **	0.00734 **	0.00368 **
Error	32				
Total	35				

Significancia (P<): '***' 0.001; '**' 0.01; '*' 0.05; '.' 0.1; ' ' 1

Los promedios de altura de las plantas de maíz bajo diferentes tratamientos en cuatro períodos de evaluación (22, 37, 51 y 63 días). Fueron a los 22 días, el tratamiento T1 alcanzó la mayor altura con 35.0 cm, seguido por T4 con 24.2 cm, T2 con 23.9 cm y T3 con 17.8 cm. A los 37 días, T1 continuó liderando con 74.4 cm, mientras que T4 y T2 alcanzaron 67.3 cm y 62.8 cm, respectivamente, y T3 quedó con 39.4 cm. A los 51 días, T1 mantuvo la mayor altura con 90.4 cm, seguido de cerca por T4 con 89.3 cm, T2 con 85.7 cm y T3 con 61.6 cm. Finalmente, a los 63 días, T2 alcanzó la mayor altura con 125.9 cm, seguido por T1 con 125.0 cm, T4 con 124.4 cm y T3 con 85.6 cm. La prueba de comparación de medias de Tukey mostró diferencias significativas entre los tratamientos en todos los períodos evaluados ($P < 0.05$), indicando que el tratamiento T1 generalmente produjo plantas más altas. Estos resultados se corroboran en la **Figura 1**, que ilustra visualmente las alturas promedio de las plantas bajo los distintos tratamientos a lo largo del período de evaluación, reflejando el impacto significativo de las diferentes condiciones experimentales en el crecimiento del maíz.

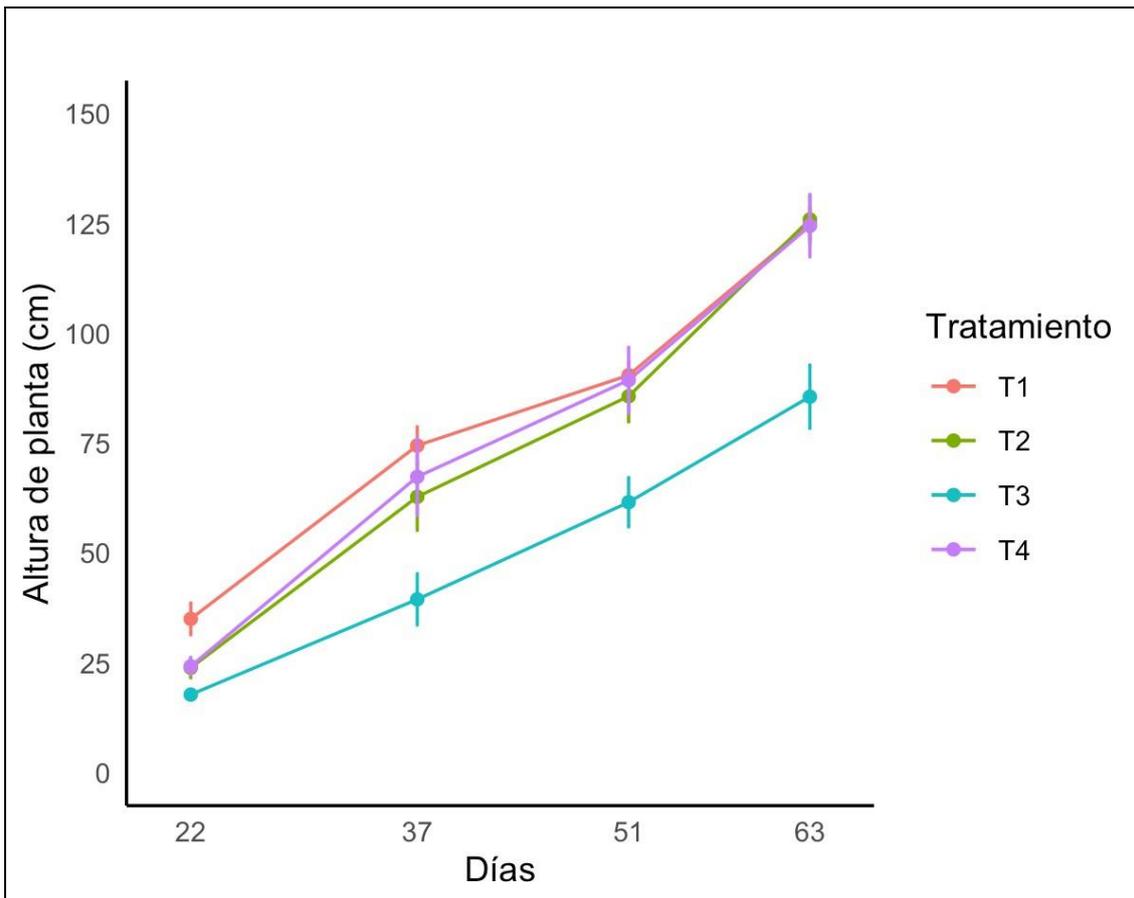


Figura 1. Altura de plantas de maíz con cuatro periodos de evaluación. Colores distintos indica diferentes tratamientos.

En la **Tabla 2**, se presenta el análisis de varianza (P-valor) del diámetro del tallo de las plantas de maíz en diferentes periodos de evaluación (22, 37, 51 y 63 días). Los resultados indican que el cadmio muestra diferencias significativas en el diámetro del tallo a los 63 días ($P < 0.010994$), mientras que en los otros periodos no presenta significancia ($P < 0.0532$ a los 22 días, $P < 0.367$ a los 37 días, y $P < 0.104$ a los 51 días). Las micorrizas, por su parte, muestran diferencias altamente significativas a los 63 días ($P < 0.000648$) y significativas a los 22 días ($P < 0.1419$), sin significancia a los 37 y 51 días ($P < 0.9197$ y $P < 0.44$, respectivamente). El tratamiento general es significativo a los 37 días ($P < 0.0161$) y altamente significativo a los 63 días ($P < 0.002096$), mientras que a los 22 y 51 días no se observan diferencias significativas ($P < 0.457$ y $P < 0.156$, respectivamente). Estos resultados sugieren que tanto el cadmio como las micorrizas influyen de manera importante en el desarrollo del diámetro del tallo, especialmente a los 63 días, lo cual es consistente con la variabilidad observada en los tratamientos aplicados.

Tabla 2. Análisis de varianza (P-valor) de diámetro de tallo de planta de maíz

F.V.	G.L	P-valor de diámetro de tallo (mm)			
		22 días	37 días	51 días	63 días
Cadmio	1	0.0532 .	0.367	0.104	0.010994 *
Micorrizas	1	0.1419	0.9197	0.44	0.000648 ***
Tratamiento	1	0.457	0.0161 *	0.156	0.002096 **
Error	32				
Total	35				

Significancia (P<): '***' 0.001; '**' 0.01; '*' 0.05; '.' 0.1; ' ' 1

El promedio del diámetro del tallo de las plantas de maíz bajo diferentes tratamientos evaluados en cuatro períodos (22, 37, 51 y 63 días). Fueron a los 22 días, los tratamientos T1, T2 y T4 tuvieron un diámetro de tallo promedio de 0.5 mm, mientras que el tratamiento T3 fue ligeramente inferior con 0.4 mm. A los 37 días, los tratamientos T1 y T4 alcanzaron un diámetro de 0.8 mm, T2 mostró 0.7 mm, y T3 se mantuvo en 0.6 mm. A los 51 días, tanto T1 como T2 llegaron a 1.0 mm, T4 a 0.9 mm, y T3 incrementó a 0.8 mm. A los 63 días, los tratamientos T4 y T2 lograron el mayor diámetro con 1.3 mm, seguidos por T1 con 1.2 mm, y T3 con el menor crecimiento relativo, alcanzando 0.9 mm. Estos resultados evidencian que los tratamientos T4 y T2 favorecieron un mayor crecimiento en el diámetro del tallo a lo largo del tiempo, especialmente al final del período de evaluación. En la **Figura 2**, se visualiza gráficamente el desarrollo del diámetro del tallo de las plantas de maíz bajo los mismos tratamientos y períodos de evaluación. La figura confirma los promedios, mostrando claramente cómo los tratamientos T4 y T2 mantienen consistentemente diámetros mayores a lo largo del período de estudio. Esta visualización resalta la eficacia de estos tratamientos en promover un desarrollo estructural más robusto del tallo de las plantas de maíz, lo cual puede ser crucial para la resistencia al acame.

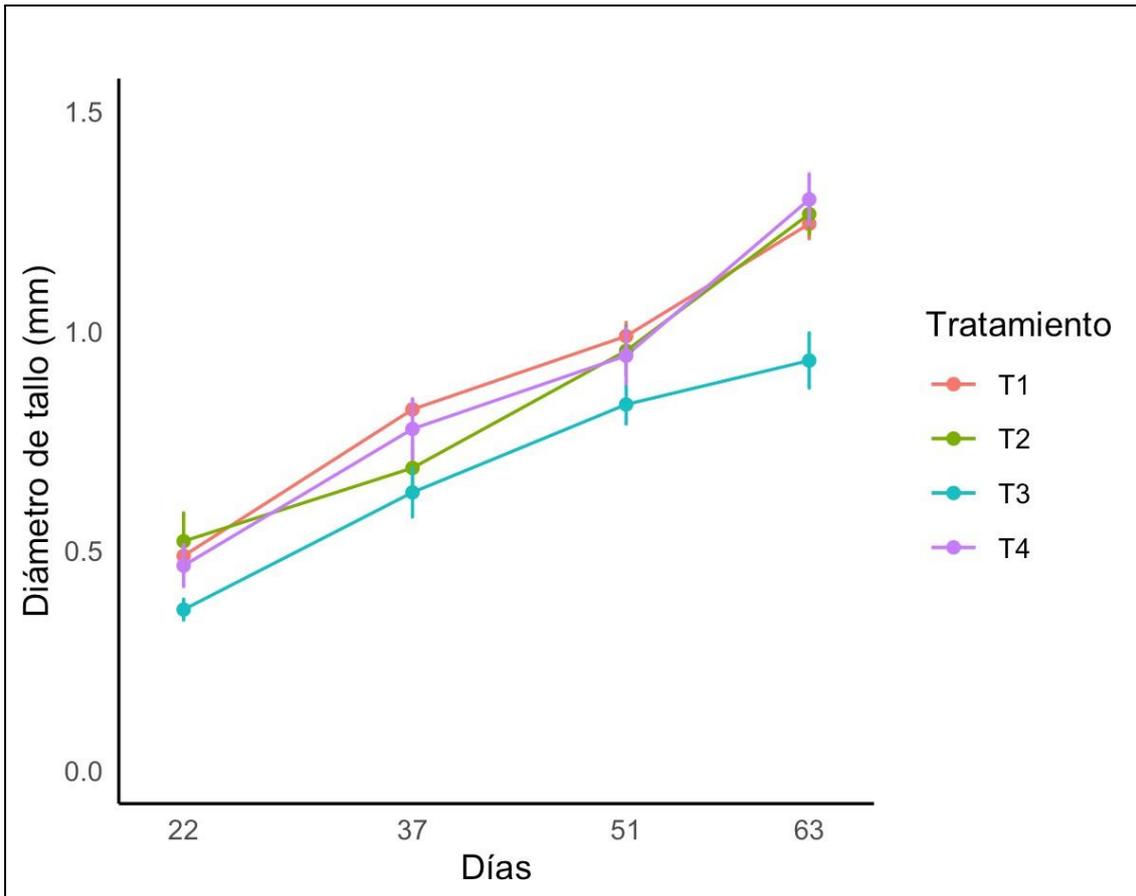


Figura 2. Diámetro de tallo de plantas de maíz con cuatro periodos de evaluación. Colores distintos indica diferentes tratamientos.

En la **Tabla 3**, se presenta el análisis de varianza (P-valor) del número de hojas de las plantas de maíz en diferentes periodos de evaluación (22, 37, 51 y 63 días). Los resultados indican que la presencia de cadmio (Cd) no tuvo un impacto significativo en los primeros tres periodos ($P < 0.8$ a los 22 días, $P < 0.587$ a los 37 días, $P < 0.6765$ a los 51 días); sin embargo, a los 63 días, el cadmio mostró una diferencia significativa ($P < 0.0119$). Por otro lado, las micorrizas presentaron una significancia marginal a los 63 días ($P < 0.0849$) y no significativa en los otros periodos ($P < 0.211$ a los 22 días, $P < 0.416$ a los 37 días, $P < 0.4878$ a los 51 días). El tratamiento general reveló significancia a los 63 días ($P < 0.0335$) y resultados no significativos en los periodos anteriores ($P < 0.136$ a los 22 días, $P < 0.109$ a los 37 días, $P < 0.0774$ a los 51 días). Estos hallazgos sugieren que los tratamientos, especialmente la combinación de cadmio y micorrizas, tienen un impacto significativo en el número de hojas en las etapas finales del crecimiento de las plantas de maíz.

Tabla 3. Análisis de varianza (P-valor) de número de hojas de planta de maíz

F.V.	G.L	P-valor de Número de hojas			
		22 días	37 días	51 días	63 días
Cadmio	1	0.8	0.587	0.6765	0.0119 *
Micorrizas	1	0.211	0.416	0.4878	0.0849 .
Tratamiento	1	0.136	0.109	0.0774 .	0.0335 *
Error	32				
Total	35				

Significancia (P<): '***' 0.001; '**' 0.01; '*' 0.05; '.' 0.1; ' ' 1

El promedio del número de hojas de las plantas de maíz bajo diferentes tratamientos en cuatro períodos de evaluación (22, 37, 51 y 63 días). Fueron a los 22 días, el tratamiento T4 mostró un promedio de 5 hojas, mientras que T1 y T2 tuvieron 4 hojas cada uno, y T3 presentó 3 hojas. A los 37 días, T1 alcanzó 6 hojas, seguido por T4, T3 y T2 con 5 hojas cada uno. A los 51 días, tanto T1 como T4 mantuvieron 6 hojas, mientras que T3 y T2 se quedaron con 5 hojas. Finalmente, a los 63 días, T1, T2 y T4 alcanzaron 8 hojas, mientras que T3 presentó 7 hojas, mostrando una diferencia significativa respecto a los demás tratamientos. En la **Figura 3**, se visualiza el desarrollo del número de hojas de las plantas de maíz a lo largo de los cuatro períodos de evaluación bajo los diferentes tratamientos. La figura confirma los promedios, destacando cómo los tratamientos T1, T2 y T4 favorecieron un mayor desarrollo foliar, especialmente al final del período de evaluación. Estos resultados sugieren que ciertos tratamientos promueven un crecimiento vegetativo más robusto, reflejado en un mayor número de hojas.

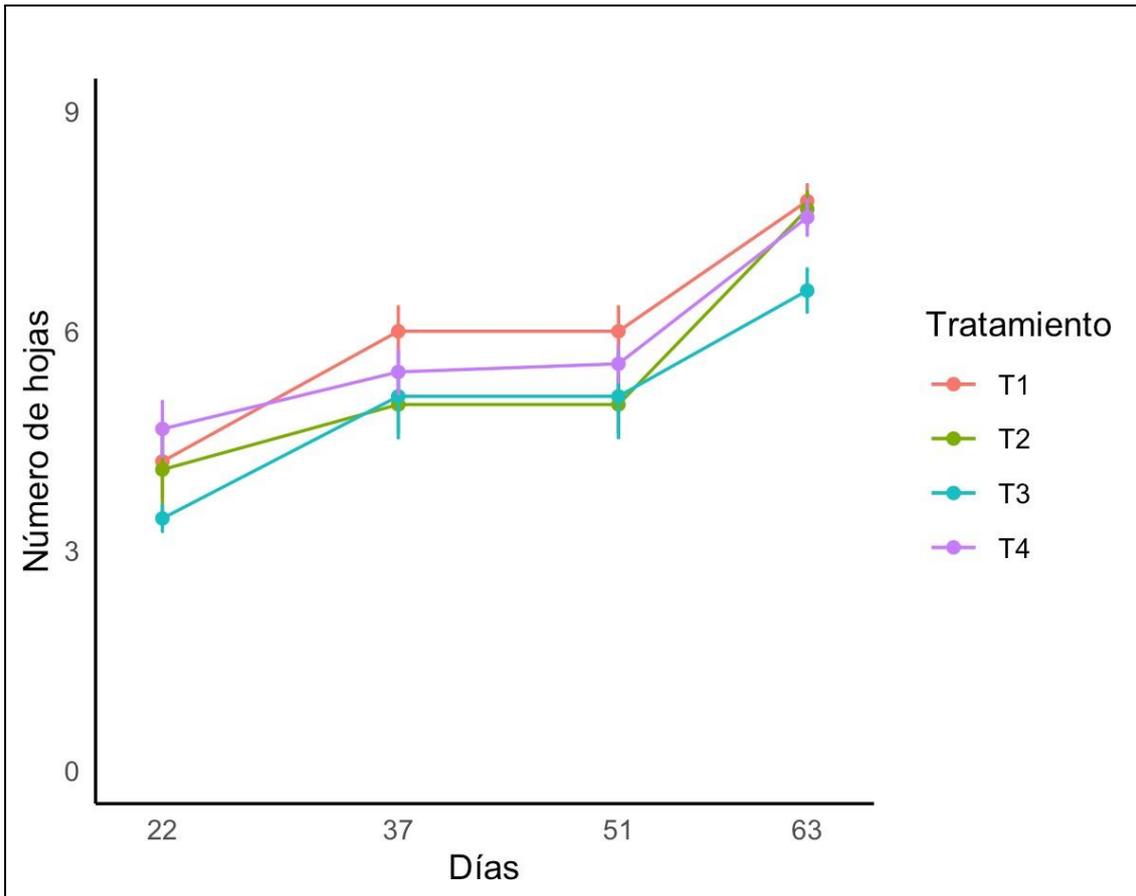


Figura 3. Número de hojas de plantas de maíz con cuatro periodos de evaluación. Colores distintos indica diferentes tratamientos.

En la **Tabla 4**, se presenta el análisis de varianza (P-valor) de la concentración de cadmio en las áreas foliares y radicales de las plantas de maíz bajo diferentes tratamientos. Los resultados indican que el tratamiento tiene un efecto significativo tanto en la acumulación de cadmio en el área foliar ($P < 0.0183$) como en el área radicular ($P < 0.00925$). Estos hallazgos sugieren que los diferentes tratamientos aplicados influyen de manera considerable en la capacidad de las plantas de maíz para acumular cadmio en sus tejidos, con una mayor significancia observada en las raíces. Este comportamiento podría estar relacionado con la capacidad diferencial de las raíces para absorber y translocar metales pesados hacia las partes aéreas de la planta, destacando la importancia de los tratamientos específicos en la gestión de la bioacumulación de cadmio en cultivos de maíz.

Tabla 4. Análisis de varianza (P-valor) de análisis de cadmio

F.V.	G.L	P-valor de análisis de cadmio	
		Foliar	Radicular
Tratamiento	3	0.0183 *	5.83e-08 *
Error	8		
Total	11		

Significancia (P<): '***' 0.001; '**' 0.01; '*' 0.05; '.' 0.1; ' ' 1

El promedio del análisis de cadmio en las áreas foliares y radicales de las plantas de maíz bajo diferentes tratamientos se destaca que el tratamiento T4 mostró la mayor concentración de cadmio tanto en el área foliar (1.1 mg/kg) como en el área radicular (6.3 mg/kg), seguido por T3 con 0.8 mg/kg en hojas y 4.5 mg/kg en raíces, mientras que los tratamientos T1 y T2 presentaron las concentraciones más bajas con 0.1 mg/kg en hojas y 0.3 mg/kg en raíces. Estos resultados sugieren que los tratamientos T4 y T3 promueven una mayor acumulación de cadmio, especialmente en las raíces, indicando una mayor capacidad de absorción y translocación de este metal pesado, lo cual puede ser una estrategia adaptativa para proteger las partes aéreas de la planta y es relevante para el desarrollo de estrategias de fitorremediación en suelos contaminados.

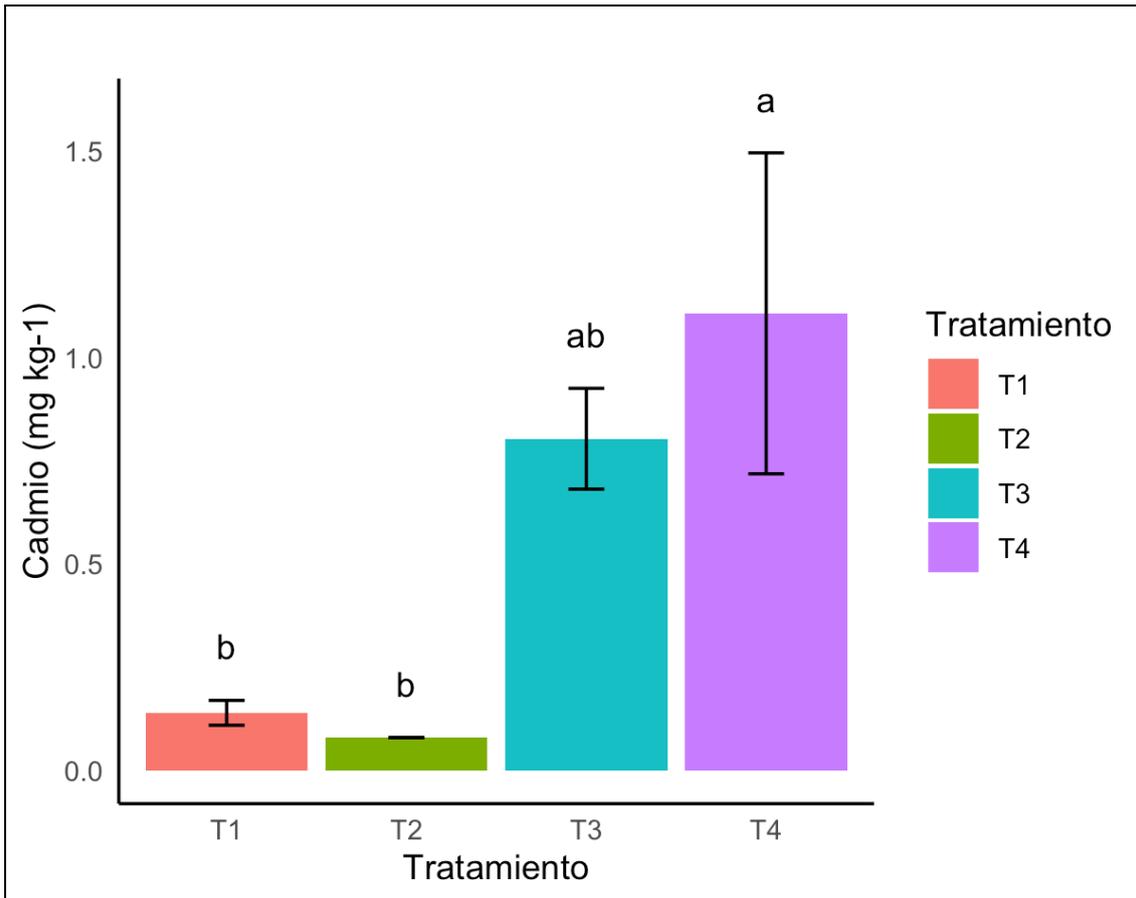


Figura 4. Comparación de medias del análisis de cadmio de la área foliar de maíz.

En la **Figura 4**, se muestra una comparación de medias del análisis de cadmio en el área foliar de las plantas de maíz bajo diferentes tratamientos. Los resultados indican que el tratamiento T4 presenta la mayor concentración de cadmio en las hojas, seguido por T3, mientras que los tratamientos T1 y T2 tienen las concentraciones más bajas. Esto sugiere que, a diferencia de los otros tratamientos, la combinación de micorrizas y cadmio en el tratamiento T4 no tuvo efecto inhibitor sobre la acumulación de cadmio en las hojas. Estos hallazgos son importantes para entender cómo los diferentes tratamientos influyen en la bioacumulación de cadmio, proporcionando información valiosa para el desarrollo de estrategias de fitorremediación y manejo de suelos contaminados.

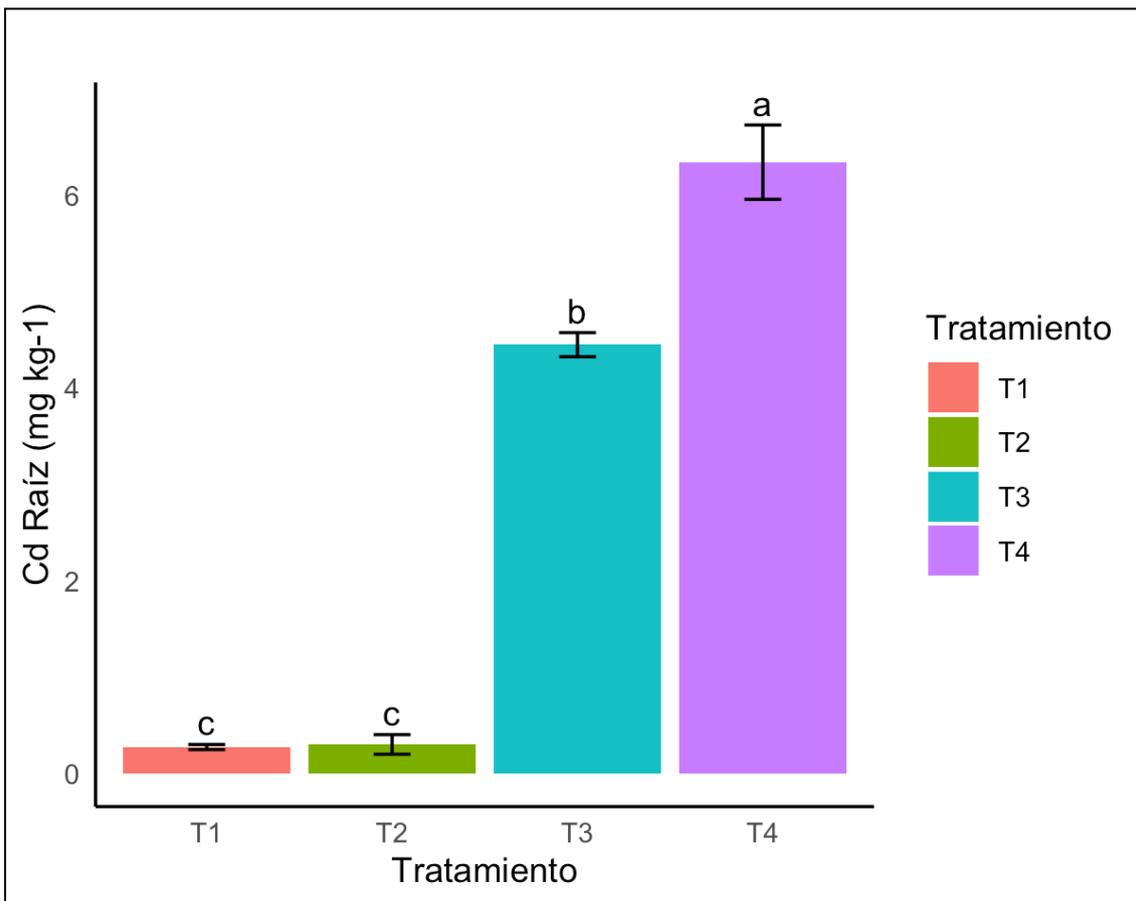


Figura 5. Comparación de medias del análisis de cadmio de la área radicular de maíz.

En la **Figura 5**, se presenta una comparación de medias del análisis de cadmio en el área radicular de las plantas de maíz bajo diferentes tratamientos. Los resultados muestran que el tratamiento T4 tiene la mayor concentración de cadmio en las raíces con 6.3 mg/kg, seguido por T3 con 4.5 mg/kg, mientras que los tratamientos T1 y T2 tienen concentraciones significativamente menores de 0.3 mg/kg cada uno. Esta figura resalta las diferencias significativas en la acumulación de cadmio en las raíces de maíz, indicando que los tratamientos con cadmio y micorrizas (especialmente T4) promueven una mayor absorción de este metal pesado en las raíces. Estos hallazgos son cruciales para entender la capacidad de las plantas de maíz para acumular cadmio en sus raíces bajo diferentes condiciones de tratamiento, y proporcionan información valiosa para el desarrollo de estrategias de fitorremediación y manejo de suelos contaminados.

En la **Tabla 5**, se presenta el análisis de varianza (P-valor) de la materia seca en las áreas foliares y radicales de las plantas de maíz bajo diferentes tratamientos. Los resultados indican que el efecto de los tratamientos en la materia seca foliar ($P < 0.0619$) y radicular ($P < 0.0609$) no alcanza niveles de significancia estadística convencionales ($P < 0.05$), pero sugiere una tendencia a influir en la acumulación de biomasa. Estos hallazgos resaltan cómo los tratamientos podrían afectar el crecimiento y la biomasa en diferentes partes de la planta bajo condiciones de cadmio y micorrizas.

Tabla 5. Análisis de varianza (P-valor) de materia seca foliar y radicular

F.V.	G.L	P-valor de Materia seca	
		Foliar	Radicular
Tratamiento	3	0.0619	0.0609
Error	8		
Total	11		

Significancia (P<): '***' 0.001; '**' 0.01; '*' 0.05; '.' 0.1; ' ' 1

El promedio de la materia seca en las áreas foliares y radicales de las plantas de maíz bajo diferentes tratamientos. Fueron en el área foliar, el tratamiento T3 mostró el mayor contenido de materia seca con 14.99 g, seguido por T2 con 9.96 g, T4 con 9.43 g, y T1 con 7.31 g. En el área radicular, el tratamiento T3 también presentó el mayor contenido con 4.45 g, seguido por T4 con 3.75 g, T2 con 2.37 g, y T1 con 1.18 g.

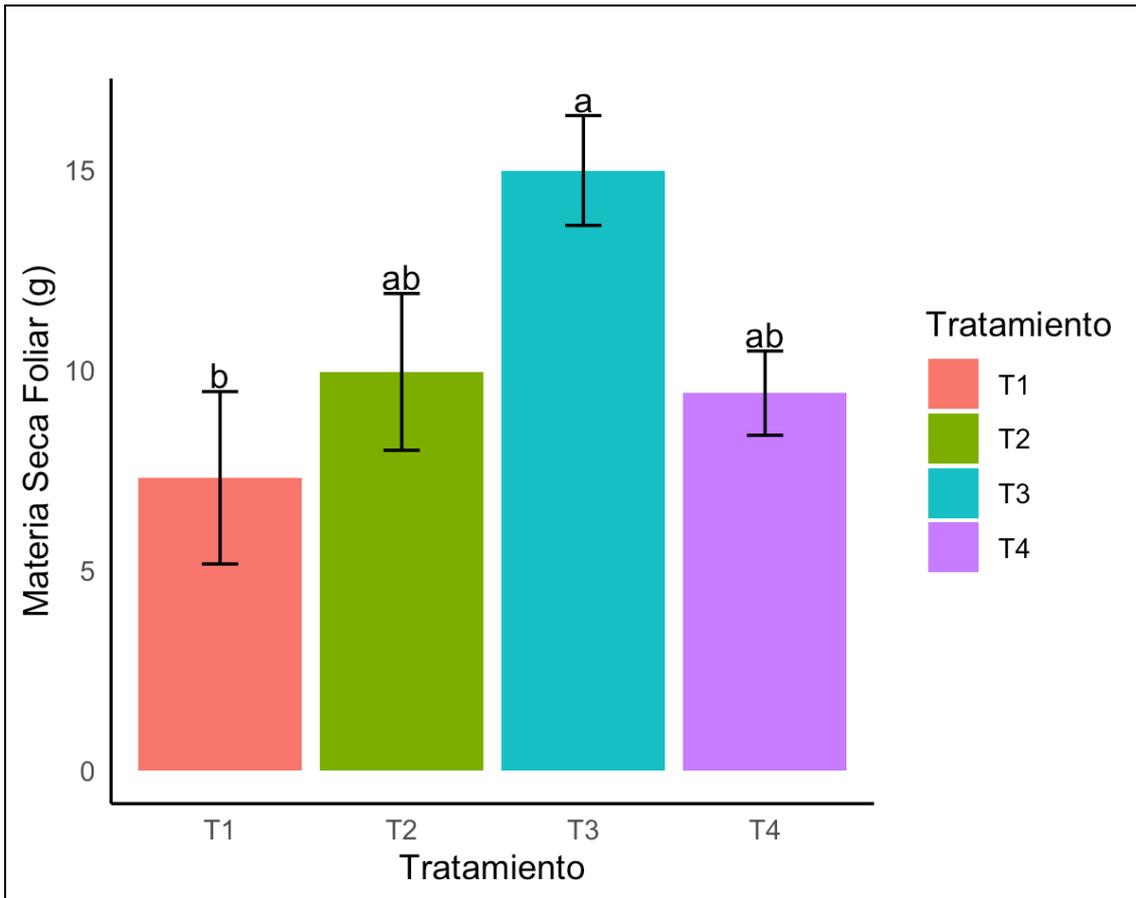


Figura 6. Comparación de medias de materia seca de la parte foliar de maíz.

En la **Figura 6**, se presenta una comparación de medias de la materia seca en el área foliar de las plantas de maíz bajo diferentes tratamientos. Los resultados indican que el tratamiento T3 muestra la mayor acumulación de materia seca con un promedio de 14.99 g, seguido por T2 con 9.96 g, T4 con 9.43 g, y T1 con 7.31 g. Esta figura ilustra claramente cómo el tratamiento T3 es el más efectivo en promover la acumulación de biomasa foliar, lo que sugiere una mejor eficiencia en la utilización de nutrientes y un mayor crecimiento vegetativo bajo este tratamiento específico.

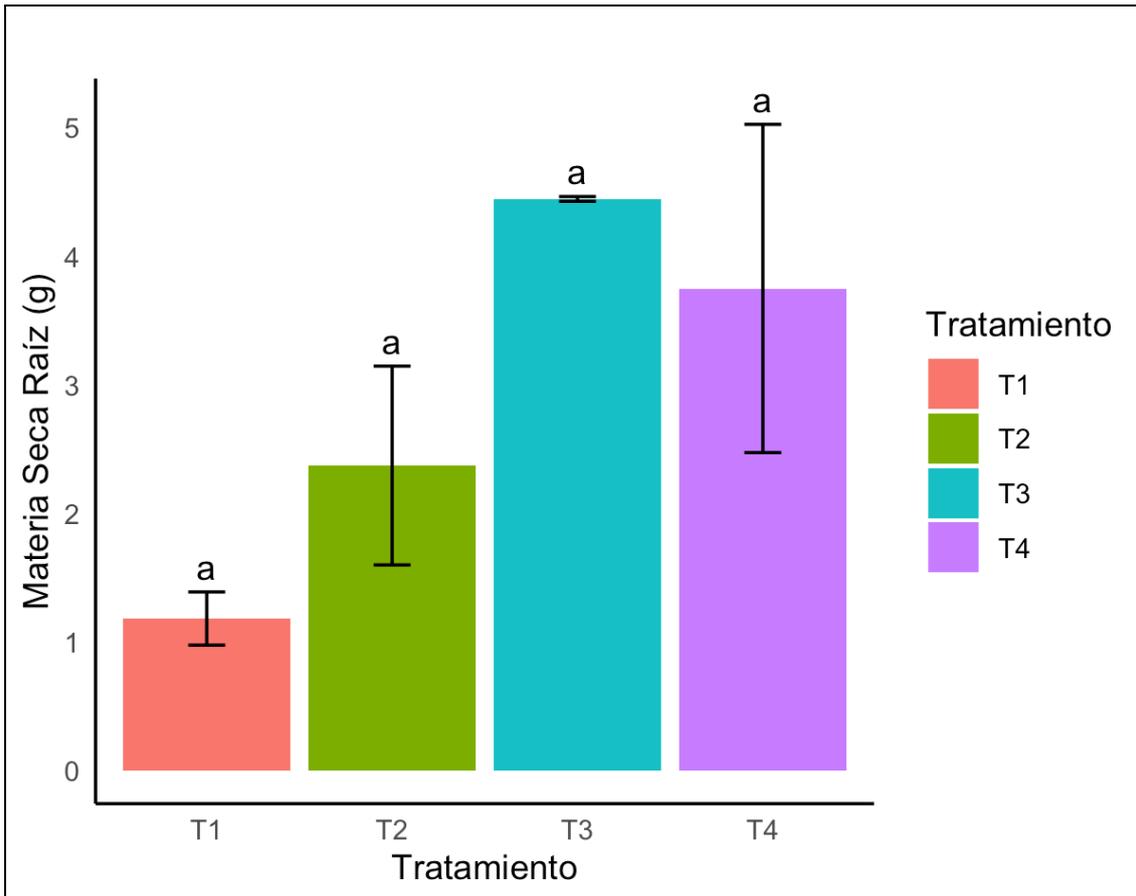


Figura 7. Comparación de medias de materia seca de la parte radicular de maíz.

En la **Figura 7**, se presenta una comparación de medias de la materia seca en el área radicular de las plantas de maíz bajo diferentes tratamientos. Los resultados indican que el tratamiento T3 muestra la mayor acumulación de materia seca en las raíces con un promedio de 4.45 g, seguido por T4 con 3.75 g, T2 con 2.37 g, y T1 con 1.18 g. Esta figura ilustra claramente cómo el tratamiento T3 es el más efectivo en promover la acumulación de biomasa radicular, lo que sugiere una mejor eficiencia en la absorción de nutrientes y un mayor desarrollo radicular bajo este tratamiento específico.

IV. DISCUSIÓN

Altura de Planta.

Los resultados obtenidos para la altura de las plantas de maíz bajo diferentes tratamientos mostraron diferencias significativas en todos los períodos evaluados. A los 22 días, el tratamiento T1 alcanzó la mayor altura con 35.0 cm, mientras que el tratamiento T3 presentó la menor altura con 17.8 cm. A medida que avanzó el ciclo de cultivo, las diferencias en altura se mantuvieron, destacando el tratamiento T2 al final del período de evaluación con 125.9 cm, seguido por T1 y T4 con alturas similares alrededor de los 125 cm. Estos resultados sugieren que la presencia de micorrizas y la ausencia de cadmio (T2) promovieron un crecimiento superior, consistente con estudios previos que indican la eficacia de las micorrizas en mejorar la absorción de nutrientes y el crecimiento vegetativo (Zhao y Naeth, 2022).

Este comportamiento también se refleja en la investigación de Ma et al. (2022), quienes encontraron que el uso de biocarbón en combinación con agentes microbianos facilita la migración de cadmio hacia las raíces, reduciendo su presencia en las partes aéreas de las plantas. Sin embargo, en este estudio, el tratamiento con cadmio y micorrizas (T4) no logró reducir significativamente los niveles de cadmio en las hojas, lo que sugiere una limitación en la efectividad de las micorrizas bajo condiciones de alta contaminación por cadmio.

Diámetro del Tallo.

El diámetro del tallo mostró un desarrollo diferencial a lo largo del tiempo según los tratamientos aplicados. Inicialmente, los tratamientos T1, T2 y T4 presentaron diámetros similares de 0.5 mm, mientras que T3 fue ligeramente inferior con 0.4 mm. A los 63 días, los tratamientos T2 y T4 lograron los mayores diámetros con 1.3 mm, indicando que estos tratamientos favorecieron un desarrollo estructural más robusto del tallo, crucial para la resistencia al acame. La literatura respalda estos hallazgos, indicando que las micorrizas pueden mejorar la estructura física de las plantas y aumentar su resistencia a condiciones adversas (Zhao y Naeth, 2022).

Además, los resultados se alinean con los estudios de Berilli et al. (2023), quienes observaron que la incorporación de humus y agentes biológicos puede estabilizar metales pesados y promover la integridad estructural de las plantas. Sin embargo, es notable que el tratamiento T3, aunque presentó un menor diámetro del tallo, no difirió significativamente en las primeras etapas del crecimiento, sugiriendo que otros factores, como la interacción específica de las micorrizas y el cadmio, podrían estar modulando este desarrollo.

Número de Hojas.

El número de hojas mostró variaciones significativas entre los tratamientos. A los 22 días, el tratamiento T4 presentó el mayor número de hojas (5), mientras que T3 tuvo el menor (3). Estas diferencias se mantuvieron a lo largo del ciclo de cultivo, con T1 alcanzando el mayor número de hojas (8) al final del período de evaluación. Estos resultados indican que los tratamientos sin cadmio y con micorrizas (T2) y el tratamiento combinado de cadmio y micorrizas (T4) favorecieron un mayor desarrollo foliar. Investigaciones previas, como las de Sarmiento y Febres (2019), han demostrado que la aplicación de enmiendas orgánicas y micorrizas mejora significativamente el crecimiento vegetativo en suelos contaminados, lo cual es consistente con los hallazgos de este estudio.

Este patrón de desarrollo foliar también se observa en estudios de Munive et al. (2020), donde tratamientos biológicos específicos aumentaron la capacidad de las plantas para acumular metales pesados en las raíces, protegiendo las partes aéreas. En este estudio, los tratamientos T2 y T4 no solo promovieron un mayor número de hojas, sino que también reflejaron una estrategia adaptativa para manejar la presencia de cadmio en el sistema radicular sin comprometer el crecimiento foliar.

Cadmio en Área Foliar y Radicular.

El análisis de cadmio en las áreas foliares y radicales mostró que los tratamientos T4 y T3 presentaron las mayores concentraciones de cadmio, especialmente en las raíces, con 6.3 mg/kg y 4.5 mg/kg respectivamente. Estos hallazgos sugieren que la combinación de cadmio y micorrizas (T4) promueve

una mayor absorción de cadmio en las raíces, lo cual es relevante para estrategias de fitorremediación.

En el tratamiento T3, aunque no se aplicaron micorrizas, las raíces del maíz absorbieron 4.5 mg/kg de cadmio, superando la cantidad inoculada de 3 mg/kg en el sustrato. Esta alta absorción puede explicarse por la capacidad natural de las raíces del maíz para acumular metales pesados. Estudios han demostrado que las plantas pueden incrementar la absorción de cadmio en respuesta a su disponibilidad en el suelo (Ma et al., 2022). Además, en condiciones controladas de maceteros, sin competencia por otros nutrientes, las raíces pueden absorber más eficientemente los metales disponibles, resultando en concentraciones más altas de cadmio en las raíces (Yu et al., 2022). Esta estrategia podría servir para proteger las partes aéreas de la planta de la toxicidad del cadmio, concentrando el metal en las raíces.

En el tratamiento T4, donde se aplicaron tanto cadmio como micorrizas, las raíces del maíz mostraron una absorción aún mayor, alcanzando 6.3 mg/kg de cadmio. Las micorrizas aumentan la capacidad de absorción de metales debido a su extensa red de hifas, que explora un volumen de suelo mucho mayor que las raíces no micorrizadas. Estas hifas pueden solubilizar y movilizar cadmio, incrementando su disponibilidad y absorción por las raíces (Yu et al., 2022). Además, las micorrizas pueden exudar ácidos orgánicos y otras sustancias que facilitan la solubilización y absorción del cadmio (Ma et al., 2022).

Materia Seca Parte Foliar y Radicular.

Los resultados de materia seca indicaron que el tratamiento T3 presentó la mayor acumulación de biomasa tanto en áreas foliares (14.99 g) como radiculares (4.45 g), seguido por T2 y T4. Estos resultados son consistentes con estudios que han demostrado la efectividad de las micorrizas en mejorar la absorción de nutrientes y promover el crecimiento vegetativo (Yang et al., 2019).

El análisis de varianza sugirió una tendencia a influir en la acumulación de biomasa, aunque no alcanzó niveles de significancia estadística convencionales. Esto podría deberse a la variabilidad en las respuestas fisiológicas de las plantas

al estrés por metales pesados, como lo discuten Berilli et al. (2023). Los tratamientos con micorrizas (T2 y T4) mostraron una mayor acumulación de biomasa comparados con los tratamientos sin micorrizas (T1 y T3), aunque la presencia de cadmio en T4 redujo este efecto positivo, resaltando la necesidad de optimizar el uso de micorrizas en suelos contaminados.

V. CONCLUSIONES

- El estudio demostró que la presencia de cadmio en el suelo influye significativamente en la bioacumulación de este metal en las plantas de maíz, con las raíces actuando como el principal sitio de acumulación. Los tratamientos con cadmio y micorrizas (T4) presentaron las mayores concentraciones de cadmio en las raíces, alcanzando 6.3 mg/kg, lo que resalta la capacidad de las micorrizas para aumentar la absorción de metales pesados.
- Los tratamientos con micorrizas, especialmente sin cadmio (T2), promovieron un mayor crecimiento en altura, diámetro del tallo y número de hojas, evidenciando un efecto positivo sobre el crecimiento vegetativo del maíz. Sin embargo, la presencia de cadmio en el tratamiento con cadmio y micorrizas (T4) limitó estos beneficios, lo que resalta la necesidad de optimizar el uso de micorrizas en suelos contaminados para maximizar sus efectos beneficiosos.
- La interacción entre cadmio y micorrizas mostró un impacto significativo en el rendimiento del maíz. Los tratamientos con micorrizas (T2 y T4) resultaron en una mayor acumulación de biomasa comparados con los tratamientos sin micorrizas (T1 y T3). No obstante, la presencia de cadmio en T4 redujo este efecto positivo.
- Los tratamientos sin micorrizas pero con cadmio (T3) también demostraron una alta capacidad de absorción de cadmio, con concentraciones en las raíces de 4.5 mg/kg. Esto subraya la eficiencia natural de las raíces de maíz para acumular metales pesados incluso sin la ayuda de micorrizas, lo que podría ser aprovechado en estrategias de fitorremediación.
- El tratamiento con solo cadmio (T3) como el tratamiento combinado con cadmio y micorrizas (T4) demostraron ser efectivos en la bioacumulación de cadmio en las raíces de maíz. Sin embargo, la adición de micorrizas mejora significativamente esta capacidad, sugiriendo que la simbiosis micorrícica es una herramienta valiosa en la mitigación de la contaminación por cadmio en suelos agrícolas.

VI. RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar estudios adicionales para determinar las condiciones óptimas de aplicación de micorrizas en suelos contaminados con cadmio. Esto incluye la evaluación de diferentes especies de micorrizas, dosis de aplicación y métodos de inoculación, con el objetivo de maximizar la absorción de nutrientes y minimizar la translocación de cadmio a las partes aéreas de las plantas.
- Se sugiere combinar el uso de micorrizas con otras enmiendas orgánicas y técnicas de biorremediación, como la aplicación de biocarbón o compost, para mejorar la eficiencia en la mitigación de la contaminación por cadmio. Estas estrategias combinadas pueden ayudar a estabilizar los metales pesados en el suelo, reducir su disponibilidad para las plantas y mejorar la salud general del ecosistema agrícola.
- Es fundamental establecer programas de monitoreo continuo para evaluar la concentración de cadmio y otros metales pesados en suelos agrícolas. Estos programas deben incluir análisis periódicos de suelo y tejido vegetal, así como la implementación de prácticas de manejo sostenible que reduzcan la acumulación de metales pesados y promuevan la productividad del suelo a largo plazo.

REFERENCIAS

- Alarcón, J., Recharte, D., Yanqui, F., Moreno, S. M., Buendía, M. A. (2020). Fertilizar con microorganismos eficientes autóctonos tiene efecto positivo en la fenología, biomasa y producción de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill). *Scientia Agropecuaria*, vol. 11, no. 1, pp. 67-73. <https://doi.org/10.17268/Sci.Agropecu.2020.01.08>.
- Álvarez, C., Kari, A., Echegaray, N., Huaraca, R., Flores, N., Barreto, J. (2022). Fertilización con humus de lombriz (*Eisenia foetida*) en el crecimiento vegetativo del cultivo de papa (*Solanum tuberosum* L.). *C&T Riqchary. Revista De Investigación En Ciencia Y Tecnología*, vol. 4, no. 1, pp. 39-45. <https://doi.org/10.57166/Riqchary/V4.N1.2022.87>.
- Berilli, S., Oliveira, D., Martineli, L., Pereira, L., Cunha, M., Pireda, S. (2023). Influence of humus on chromium absorption by coffee seedlings grown on substrate containing tannery sludge. *Revista Ceres*, vol. 70, no. 1, pp. 87-97. <https://doi.org/10.1590/0034-737x202370010010>
- Booth, B. *Methods in Plant Ecology*. Oxford University Press, 2015.
- Brady, N. C.; Weil, R. R. *The Nature and Properties of Soils*. 15th ed. Pearson, 2016.
- Brundrett, M., Bougher, N., Dell, B., Grove, T., Malajczuk, N. (1996). Working with mycorrhizas in forestry and agriculture. *Australian Centre for International Agricultural Research*, 374 pp. <http://researchrepository.murdoch.edu.au/id/eprint/23747>.
- Castro, J., Gómez, L., Camargo, E. (2023). La investigación aplicada y el desarrollo experimental en el fortalecimiento de las competencias de la sociedad del siglo XXI. *Tecnura*, vol. 27, no. 75. <https://doi.org/0.14483/22487638.19171>.
- Chancay, J., Fienco, A. (2023). Impacto ambiental de los plaguicidas utilizados en el cultivo de maíz (*Zea mays* L.) en la comuna Sancán. *Dominio De*

Las Ciencias, vol. 9, no. 2, pp. 675-687.
<https://dominiodelasciencias.com/ojs/index.php/es/article/view/3306>.

Díaz, L. (2011). La observación. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).

https://www.psicologia.unam.mx/documentos/pdf/publicaciones/La_observacion_Lidia_Diaz_Sanjuan_Texto_Apoyo_Didactico_Metodo_Clinico_3_Sem.pdf.

Fernández, S. (2020). Diseño de experimentos: Diseño factorial. Universitat Politècnica de Catalunya.

https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/339723/Tfm_Fernandez_Bao_Sheila.pdf?sequence=1.

García, G., Hernández, M., Orozco, H., Suárez, G. (2019). Agroquímicos y presencia de aflatoxinas en maíz de temporal almacenado: Riesgos para la seguridad alimentaria en el estado de Tlaxcala, México. CIBA Revista Iberoamericana de las Ciencias Biológicas y Agropecuarias, vol. 8, no. 16, pp. 106-130. <https://doi.org/10.23913/Ciba.V8i16.93>.

Ghani, A., A., U., U., A. (2010). Effect of lead toxicity on growth, chlorophyll and lead (Pb) contents of two varieties of maize (Zea mays L.). Pakistan Journal of Nutrition, vol. 9, pp. 887-891.

Guido, S., Febres, S. (2021). Recuperación de plomo en suelo agrícola contaminado artificialmente como estrategia de remediación mediante girasol y vermicompost. Revista Chapingo Serie Horticultura, vol. 27, no. 3, pp. 199-212. <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2021.04.007>.

Guo, L., Liu, J., Chen, Y., Zhang, X. (2021). Remediación de suelos contaminados con alta concentración de cromo mediante el método electrodinámico mejorado. Revista de Investigación de Ciencias de la Tierra, vol. 25, no. 2, pp. 247-253.
<https://doi.org/10.15446/esri.v25n2.93896>.

Henderson, L.; Perry, R. Plant Analysis Handbook II. MicroMacro Publishing, Inc., 2006.

International Agency For Research On Cancer. (27 de septiembre de 2021). Agents classified by the IARC Monographs, volumes 1-129. <https://monographs.iarc.fr/agents-classified-by-the-iarc/>.

Jabborova, D., Annapurna, K., Paul, S., Kumar, S., Saad, H., Desouky, S. (2021). Beneficial features of biochar and arbuscular mycorrhiza for improving spinach plant growth, root morphological traits, physiological properties, and soil enzymatic activities. Journal of Fungi, vol. 7, no. 7, pp. 1-16. <https://doi.org/10.3390/jof7070571>.

Jabborova, D., Davranov, K., Jabbarov, Z., Bhowmik, S., Ercisli, S., Danish, S. (2022). Dual inoculation of plant growth-promoting *Bacillus endophyticus* and *Funneliformis mosseae* improves plant growth and soil properties in ginger. ACS Omega, vol. 7, no. 39. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c02353>.

Jáquez, S., Pérez, G., Márquez, A., Pérez, G. (2022). Impactos económicos y ambientales de los plaguicidas en cultivos de maíz, alfalfa y nogal en Durango, México. Revista Internacional de Contaminación Ambiental, vol. 38, pp. 219-233. <https://doi.org/10.20937/rica.54169>.

Khan, A., et al. Effect of different levels of lignin on wheat seed germination. Plant Biology. 2017, vol. 19, no. 5, pp. 732-737. <https://doi.org/10.1111/plb.12565>

Li, N., Luo, L., Zhang, H., Zhao, Y., Li, Q., Cai, M., Wong, Y. (2016). Do arbuscular mycorrhizal fungi affect cadmium uptake kinetics, subcellular distribution and chemical forms in rice? Science of the Total Environment, vol. 571, pp. 1183-1190. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.07.124>.

Li, R., Meng, H., Zhao, L., Zhou, H., Shen, Y., Zhang, X., Ding, J., Cheng, H., Wang, J. (2019). Study of the morphological changes of copper and zinc during pig manure composting with addition of biochar and a microbial

agent. Bioresource Technology, vol. 291.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121752>.

Lindsay, W. L.; Norvell, W. A. Development of a DTPA Soil Test for Zinc, Iron, Manganese, and Copper. *Soil Science Society of America Journal*. 1978, vol. 42, no. 3, pp. 421-428.
<https://doi.org/10.2136/sssaj1978.03615995004200030009x>

Lozano, M., Suárez, F. (2022). *Remediación del suelo del cultivo de arroz, con dolomita y humus, Cacatachi, 2022. Tesis de pregrado. Universidad César Vallejo, Tarapoto, Perú.*
<https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/105119>.

Ma, W., Sun, T., Xu, Y., Zheng, S., Sun, Y. (2022). In-situ immobilization remediation, soil aggregate distribution, and microbial community composition in weakly alkaline Cd-contaminated soils: A field study. *Environmental Pollution*, vol. 292.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118327>.

Martínez, F., Guevara, C., Aguilar, L., Rodríguez, M., Reyes, O., Arias, M. (2020). Caracterización físico-química y biológica del suelo cultivado con maíz en sistemas convencional, agroecológico y mixto en la Frailesca, Chiapas. *Terra Latinoamericana*, vol. 38, pp. 871-881.
<https://doi.org/10.28940/terra.v38i4.793>

Mathur, S., Sharma, M. (2018). Mejora de la eficacia fotosintética de plantas de maíz (*Zea mays*) con hongos micorrízicos arbusculares (HMA) bajo estrés por altas temperaturas. *Fotobiol*, vol. 180, pp. 149-154.
<https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2018.02.002>

Miller, R. M.; Jastrow, J. D. The role of mycorrhizal fungi in soil conservation. In: Bethlenfalvay, G. J.; Linderman, R. G., eds. *Mycorrhizae in sustainable agriculture*. ASA Special Publication 54. 1992, pp. 29-44.

Montgomery, D. C. *Design and Analysis of Experiments*. 8th ed. John Wiley & Sons, 2013.

- Munive, R., Gamarra, G., Munive, Y., Puertas, F., Valdiviezo, L., Cabello, R. (2020). Absorción de plomo y cadmio por girasol de un suelo contaminado, remediado con enmiendas orgánicas en forma de compost y vermicompost. *Ecología Aplicada*, vol. 19, no. 1, pp. 13-23. <https://doi.org/10.21704/rea.v19i1.1371>
- Murillo, S., Mendoza, A., Fadul, C. La importancia de las enmiendas orgánicas en la conservación del suelo y la producción agrícola. *Revista Colombiana de Investigaciones Agroindustriales*. 2019, vol. 7, no. 1, pp. 58–68. <https://doi.org/10.23850/24220582.2503>.
- Oyarce, F., Rodríguez, J. Influencia en la contaminación por plaguicidas en la calidad de suelo de cultivo de arroz en el distrito de Cacatachi, provincia de San Martín. Tesis de pregrado. Universidad César Vallejo, Tarapoto, Perú, 2021. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/71922>.
- Pedranzani, H., Rodríguez, M., Gutiérrez, M., Porcel, R., Hause, B. La simbiosis de micorrizas arbusculares regula la fisiología y el rendimiento de las plantas de *Digitaria eriantha* sometidas a estrés abiótico mediante la modulación de los niveles de antioxidantes y jasmonatos. *Micorrizas*. 2016, vol. 26, pp. 141-152. <https://doi.org/10.1007/S00572-015-0653-4>.
- Phillips, J., Hayman, D. Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. *Transactions of the British Mycological Society*. 1970, vol. 55, no. 1, pp. 158–161. [https://doi.org/10.1016/S0007-1536\(70\)80110-3](https://doi.org/10.1016/S0007-1536(70)80110-3).
- Poma, A., Quiñonez, C. Efecto de enmiendas orgánicas en la fitorremediación con *Zea mays* L. en un suelo contaminado con cadmio. Leonor Ordoñez, Jauja - 2021. Tesis de pregrado. Universidad Continental, Huancayo, Perú, 2022. https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20_500.12394/11108.
- Rice, E., Baird, R., Eaton, A., Clesceri, L. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. American Public Health Association, 2012, 541 pp.

- Sapaico, Y. Efecto de la cal, materia orgánica y EM en el contenido de cadmio de un suelo contaminado en el Centro Poblado de Huancaní, distrito de Leonor Ordoñez, provincia de Jauja – 2019. Tesis de pregrado. Universidad Continental, Huancayo, Perú, 2020.
https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/8166/3/IV_Fin_107_Te_Sapaico_Chancasanampa_2020.pdf
- Sieverding, E. Manual de métodos para la investigación de la micorriza vesículo arbuscular en el laboratorio. Centro Internacional de Agricultura Tropical, 1983, 123 pp. <https://cgspace.cgiar.org/handle/10568/54137>.
- Smith, S. E.; Smith, F. A. Roles of Arbuscular Mycorrhizas in Plant Nutrition and Growth: New Paradigms from Cellular to Ecosystem Scales. Annual Review of Plant Biology. 2015, vol. 66, pp. 577-612.
<https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-043014-114623>
- Taherdoost, H. Sampling methods in research methodology: how to choose a sampling technique for research. Social Science Research Network, 2016.
<https://doi.org/10.2139/ssrn.3205035>.
- Tanya, M., Leiva, M. Microorganismos eficientes, propiedades funcionales y aplicaciones agrícolas. Centro Agrícola. 2019, vol. 46, no. 2, pp. 93-103.
http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0253-57852019000200093&lng=es&tlng=es.
- Yang, K., Zhu, L., Zhao, Y., Wei, Z., Chen, X., Yao, C., Meng, Q., Zhao, R. Novel method for removing heavy metals from composting system: The combination of functional bacteria and adsorbent materials. Bioresource Technology. 2019, vol. 293.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122095>.
- Yu, X., Yan, M., Cui, Y., Liu, Z., Liu, H., Zhou, J., Liu, J., Zeng, L., Chen, Q., Gu, Y., Zou, L., Zhao, K., Xiang, Q., Ma, M., Li, S. Effects of co-application of cadmium-immobilizing bacteria and organic fertilizers on *Houttuynia cordata* and microbial communities in a cadmium-contaminated field.

Frontiers in Microbiology. 2022, vol. 12.
<https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.809834>.

Zar, J. H. Biostatistical Analysis. 5th ed. Pearson Prentice-Hall, 2010.

Zhang, J., Su, L., Yan, K., Li, M., He, Y., Zu, Y., Zhan, F., Li, T. An arbuscular mycorrhizal fungus increased the macroaggregate proportion and reduced cadmium leaching from polluted soil. *Int J Phytoremediation*. 2020, vol. 23, no. 7, pp. 684-692. <https://doi.org/10.1080/15226514.2020.1849014>.

Zhao, Y., Naeth, M. Soil amendment with a humic substance and arbuscular mycorrhizal fungi enhance coal mine reclamation. *The Science of the Total Environment*. 2022, vol. 823.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153696>.

ANEXOS

Anexo 1: Matriz de operacionalización de variables

VARIABLE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES	ESCALA
Independiente Concentración de Cadmio	Nivel de cadmio presente en el sustrato utilizado para el cultivo de maíz.	Medición de cadmio en el suelo antes de la siembra y en la planta al final del ciclo de cultivo.	Concentración en el suelo	mg kg ⁻¹ en el suelo	Razón
			Concentración en la planta	mg kg ⁻¹ en raíces y partes aéreas	
Independiente Inoculación de Micorrizas	Proceso mediante el cual las micorrizas se introducen en el sistema radicular de las plantas para mejorar la absorción de nutrientes y la resistencia a contaminantes como metales pesados.	Aplicación de una dosis específica de Myco Grow a las macetas donde se cultiva el maíz.	Dosis de inoculación	Gramos de Myco Grow	Razón
Dependiente Acumulación de Cadmio	Capacidad de <i>Zea mays</i> L. para acumular cadmio en sus tejidos a partir del suelo contaminado.	Medición del total de cadmio acumulado en las raíces y tejidos aéreos de la planta después de su ciclo de crecimiento.	Acumulación en raíces	mg kg ⁻¹ acumulado en raíces	Razón
			Acumulación en parte aérea	mg kg ⁻¹ acumulado en parte aérea	
Dependiente Morfología de <i>Zea mays</i> L.	Cambios en la estructura física de <i>Zea mays</i> L. debido a la exposición al cadmio y/o la interacción con micorrizas.	Evaluación de características físicas como altura de la planta, número de hojas y diámetro del tallo a lo largo del ciclo de cultivo.	Altura	Centímetros de altura	Intervalo
			Número de hojas	Cantidad de hojas	
			Diámetro del tallo	Milímetros de diámetro del tallo	

Anexo 2: Descripción de tratamientos

Cultivo	Cadmio (mg kg ⁻¹)	Micorrizas (gramos)	Tratamiento
Maíz (<i>Zea mays</i>)	0 mg kg ⁻¹	0 gr	T1
		2 gr	T2
	3 mg kg ⁻¹	0 gr	T3
		2 gr	T4

Anexo 3: Ficha de evaluación Morfológico

Ficha de Evaluación Morfológico

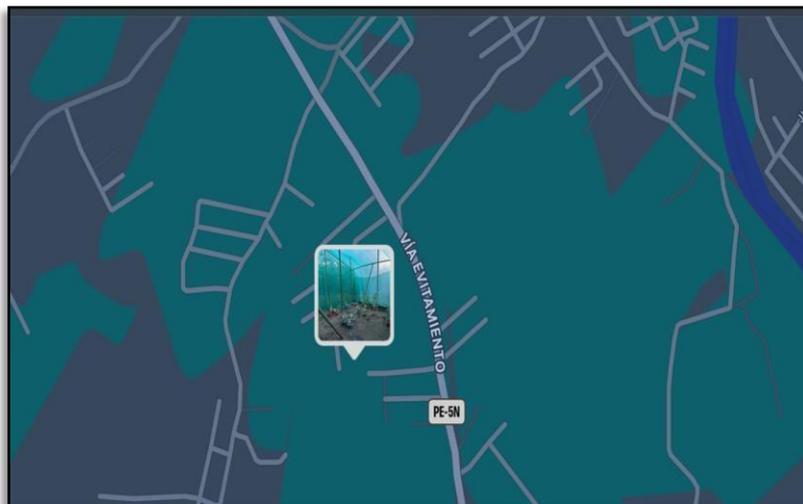
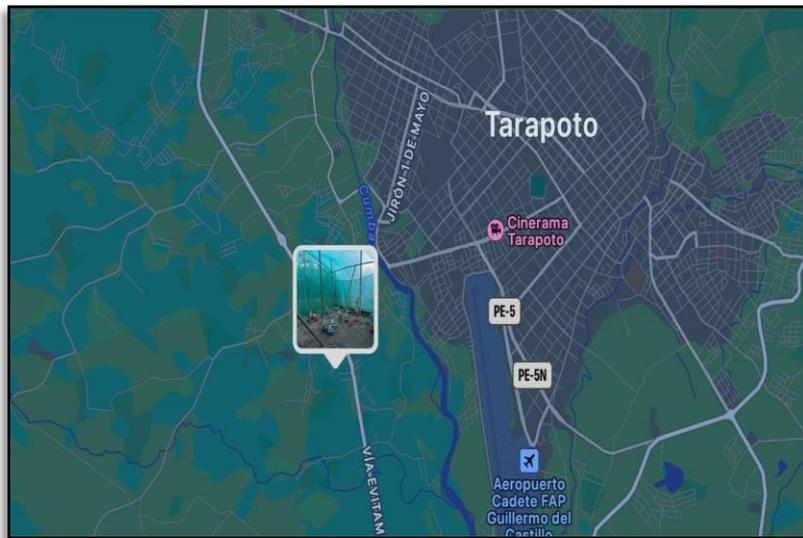
Evaluador:

Fecha:

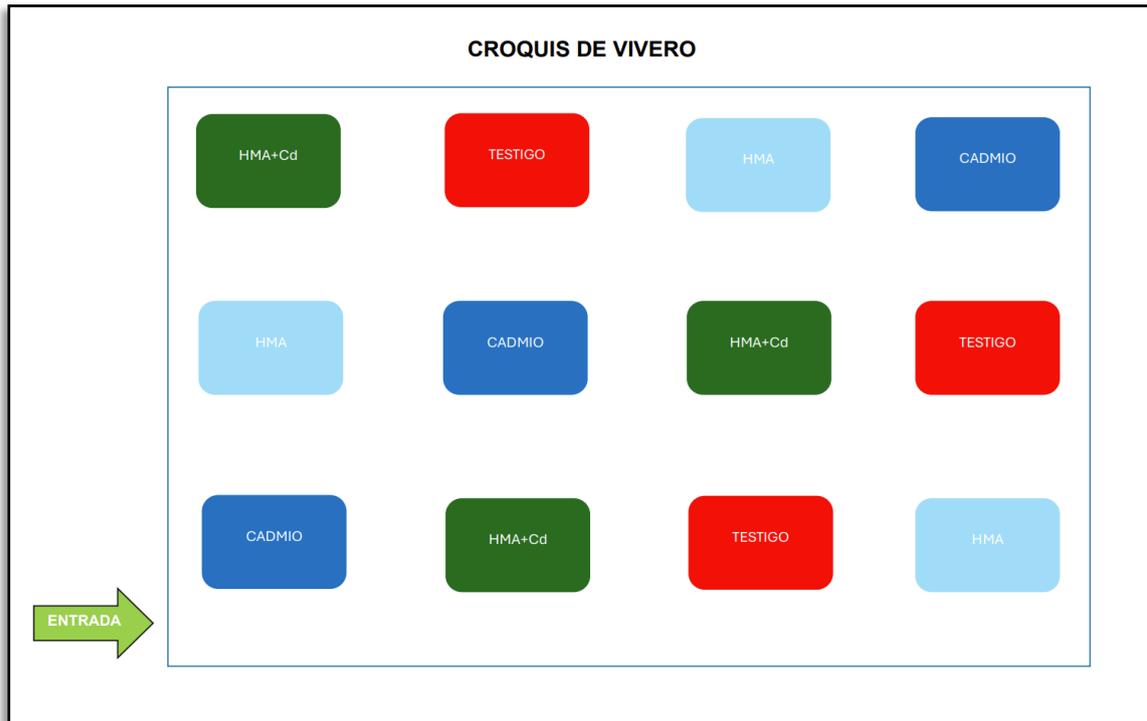
Tratamiento	Repetición	Nº de planta	Altura de planta (cm)	Diámetro de tallo (mm)	Nº de hojas	Observaciones
T1 (Testigo)	r1	1				
	r2	2				
	r3	3				
	r4	4				
	r5	5				
	r6	6				
	r7	7				
	r8	8				
	r9	9				
T2 (HMA)	r1	1				
	r2	2				
	r3	3				
	r4	4				
	r5	5				
	r6	6				
	r7	7				
	r8	8				
	r9	9				
T3 (Cd)	r1	1				
	r2	2				
	r3	3				
	r4	4				
	r5	5				
	r6	6				
	r7	7				

	r8	8				
	r9	9				
T4 (Cd+HMA)	r1	1				
	r2	2				
	r3	3				
	r4	4				
	r5	5				
	r6	6				
	r7	7				
	r8	8				
	r9	9				

Anexo 4: Ubicación de vivero temporal



Anexo 5: Croquis de tratamiento



Anexo 6: Construcción de vivero





Anexo 7: Preparación de sustrato



Anexo 8: Evaluación morfológica

