



UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO

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

**Influencia de suelos contaminados con cadmio en la
micorrización y contenido de clorofila en “arroz” Oriza sativa (L.)
en San Martín, 2022.**

**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
Ingeniero Ambiental**

AUTORES:

Lopez Espinoza, Herman (orcid.org/0000-0002-3148-1770)
Tuanama Montenegro, Stalin Yoel (orcid.org/0000-0003-0942-7521)

ASESOR:

Dr. Vallejos 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

2022

Dedicatoria

Con gran amor, respeto e inmenso agradecimiento a mis padres, por su gran esfuerzo y esfuerzo puesto para verme profesional y todo por siempre, siendo cada día mi soporte desde siempre. Asimismo, a los valores éticos y morales inculcados en el transcurrir de mi vida y a todos mis amigos cercanos que siempre muestran cariño y respeto hacia mí.

Herman López Espinoza

Este logro no sería posible sin el apoyo de mis seres queridos; mis padres quienes son todo y están apoyándome en todo momento. Un esfuerzo enorme que realizaron toda la vida universitaria con su apoyo moral, económico entre otros y por los sabios valores inculcados en mi persona.

A mi familia por todo el apoyo brindado y estar siempre pendiente de mi para seguir adelante, gracias a ellos hoy se ve logrado este anhelo de ser profesional en el área de ingeniería Ambiental.

Stalin Yoel Tuanama Montenegro

Agradecimiento

A Dios eterno que me mantiene con vida por siempre. Gracias a mis padres hago realidad este anhelado logro de mi formación profesional, por brindarme sus conocimientos. Un agradecimiento a mis amigos y en especial al Dr. Geomar Vallejos Torres por brindarme su apoyo científico y técnico como asesor del presente estudio de investigación que impulsaron a cumplir mi meta.

Herman López Espinoza

Al Dios eterno que me ilumina en el logro de esta meta tan sacrificada pero que se ve reflejado en el logro importante de llegar a ser un profesional. Del mismo modo al ingeniero Geomar Vallejos Torres, por el apoyo incondicional para el logro de este estudio mediante un trabajo de investigación experimental.

Stalin Yoel Tuanama Montenegro

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Dedicatoria	iii
Agradecimiento	iv
Índice de contenidos	v
Índice de tablas	viii
Índice de figuras	viii
Resumen	ixi
Abstract	xx
I. INTRODUCCIÓN	1
II. MARCO TEÓRICO	5
III. METODOLOGÍA	11
3.1. Tipo y diseño de investigación	11
3.2. Variables y operacionalización	12
3.3. Población (criterios de selección), muestra, muestreo.....	13
3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos	14
3.5. Procedimientos	14
3.6. Análisis de datos	19
3.7. Aspectos éticos	20
IV. RESULTADOS	21
4.1. Niveles del cadmio en raíces y hojas de plántulas de <i>Oryza sativa</i> sembradas en suelos contaminados con cadmio	21
4.2. Número de esporas y colonización micorrícica en plántulas de <i>Oryza sativa</i> sembradas en suelos contaminados con cadmio.	25
4.3. Contenido de clorofila en plántulas de <i>Oryza sativa</i> sembradas en suelos contaminados con cadmio.	28
V. DISCUSIÓN	31

5.1. Niveles del cadmio en raíces y hojas de plántulas de <i>Oryza sativa</i> sembradas en suelos contaminados con cadmio	31
5.2. Número de esporas y micorrización en plántulas de <i>Oryza sativa</i> sembradas en suelos contaminados con cadmio.	33
5.3. Contenido de clorofila en plántulas de <i>Oryza sativa</i> sembradas en suelos contaminados con cadmio.	35
VI. CONCLUSIONES	37
VII. RECOMENDACIONES	38
REFERENCIAS	48
ANEXOS	60

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Característica fisicoquímica de los tratamientos estudiados	14
Tabla 2. Distribución de tratamiento en el experimento	20
Tabla 3. Análisis de varianza (ANOVA) para el contenido de clorofila en plantas de arroz.....	21
Tabla 4. Análisis de varianza (ANOVA) para el contenido de Cd en hojas de plantas de arroz.....	23
Tabla 5. Análisis de varianza (ANOVA) para el número de esporas de HMA	25
Tabla 6. Análisis de varianza (ANOVA) para la colonización micorrízica	27
Tabla 7. Análisis de varianza (ANOVA) para el contenido de clorofila en plantas de arroz.....	29

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Mapa del ámbito de ejecución de la investigación	12
Figura 2. Preparación del medio de crecimiento para el estudio.....	15
Figura 3. Preparación del cloruro y su incorporación a los sustratos	16
Figura 4. Multiplicación de micorrizas arbusculares	17
Figura 5. Germinación y repique de semillas de arroz	18
Figura 6. Evaluación de la morfología del arroz (raíces y hojas).....	19
Figura 7. Efectos de la inoculación de HMA y adición de Cd sobre el cadmio en raíces de plantas de arroz en suelos contaminados con cadmio	22
Figura 8. Efectos de la inoculación de HMA y adición de Cd sobre el cadmio en hojas de plantas de arroz en suelos contaminados con cadmio	24
Figura 9. Efectos de la inoculación de HMA y adición de Cd sobre el número de esporas en plantas de arroz.....	26
Figura 10. Efectos de la inoculación de HMA y adición de Cd sobre la colonización micorrízica en plantas de arroz	28
Figura 11. Efectos de la inoculación de HMA, enmienda orgánica y adición de Cd sobre la longitud de micelio extra radical en plantas de cacao.....	30

Resumen

El estudio presenta el efecto de suelos contaminados con cadmio en la presencia de micorrizas arbusculares y contenido de clorofila en plántulas de arroz (*Oryza sativa*) en Tarapoto, Perú. Se emplearon sustratos en base a tierra agrícola y arena media lavada y autoclavada. El estudio estuvo constituido por las concentraciones de cadmio en razón a 0 y 5 mg.kg⁻¹. El Cd como cloruro fue vaciado al sustrato cuidadosamente 15 días antes del establecimiento de las plántulas de arroz, en seguida semillas de arroz fueron sembradas en bandejas germinadoras de 20 cm x 30 cm con arena fina esterilizada. Al cabo de 22 días las plántulas de arroz fueron extraídas y repicadas en maceteros con 3 kilogramos de sustratos donde se incorporaron 2000 esporas de micorrizas arbusculares con diferentes especies en forma de consorcios. El ensayo estuvo diseñado al azar con arreglo factorial de dos factores; siendo estas: 2A (Consortios de HMA) x 2B (Dosis de cadmio), cada tratamiento presentó 6 repeticiones, utilizándose un total de 24 plantas de arroz. Se utilizó medias de comparación de Tukey con 5 % de error. Los análisis fueron pasados por el programa R versión 4,0,2. La colonización micorrícica fue mayor cuando se aplicaron HMA a las plantas de arroz con 65,92 %; al mismo tiempo se obtuvo un alto número de esporas con 773,33. El contenido de cadmio en plantas fue mayor en los tratamientos que recibieron cloruro de cadmio, llegando a alcanzar valores desde 10,68 mg.kg⁻¹ en el sistema radicular y 1,84 mg.kg⁻¹ en las hojas de las plantas del arroz. Mientras que el contenido de clorofila fue de 32,30 MJm⁻¹. Se concluyó que la inoculación de HMA redujo significativamente la absorción de Cd del suelo a la parte aérea en plantas de arroz evaluado a los 90 días en suelos contaminados con cadmio.

Palabras Clave: *Cadmio, cloruro de cadmio, arroz, suelo contaminado, Tarapoto.*

Abstract

The study presents the effect of soils contaminated with cadmium on the presence of arbuscular mycorrhizae and chlorophyll content in rice (*Oryza sativa*) seedlings in Tarapoto, Peru. Substrates based on agricultural land and medium washed and autoclaved sand were used. The study consisted of the concentrations of cadmium in proportion to 0 and 5 mg.kg⁻¹. The Cd as chloride was carefully emptied to the substrate 15 days before the establishment of the rice seedlings, then rice seeds were sown in 20 cm x 30 cm germinating trays with sterilized sand. After 22 days, the rice seedlings were extracted and pricked into pots with 3 kilograms of substrates where 2000 arbuscular mycorrhizal spores with different species were incorporated in the form of consortia. The trial was randomly designed with a two-factor factorial arrangement; being these: 2A (AMF consortia) x 2B (Cadmium dose), each treatment presented 6 repetitions, using a total of 24 rice plants. Tukey comparison means were obtained with a 5% error. The analyzes were passed by the R program version 4.0.2. Mycorrhizal colonization was higher when AMF was applied to rice plants with 65,92%; at the same time a high number of spores was obtained with 773,33. The cadmium content in plants was higher in the treatments that received cadmium chloride, reaching values from 10,68 mg.kg⁻¹ in the root system and 1,84 mg.kg⁻¹ in the leaves of the rice plants. While the chlorophyll content was 32.30 MJm⁻¹. It was concluded that the inoculation of AMF significantly reduced the absorption of Cd from the soil to the aerial part in rice plants evaluated at 90 days in soils contaminated with cadmium.

Keywords: Cadmium, cadmium chloride, rice, contaminated soil, Tarapoto.

I. INTRODUCCIÓN

El departamento de San Martín es considerado como el lugar con mayor producción de arroz, cuya área cosechada es de 101 255 ha y una producción promedio de 7 t/ha (Ministerio de Agricultura y Riegos [MINAGRI], 2017). Esta extensa área con el sembrío de arroz ha demandado altos niveles de uso de agua; asimismo, alta aplicación de fertilizantes químicos como el nitrógeno que requiere en promedio 150 kg ha⁻¹ durante toda su campaña, provocando afectaciones a las características del suelo. Debido a los requerimientos de fertilizantes que requiere este cultivo, ha provocado elevados niveles de cadmio (Cd) en suelos y raíces de cultivares de arroz (Chavez, et al. 2015). El arroz también absorbe y acumula metales tóxicos como el cadmio (Cd), que son dañinos tanto para el arroz como para los seres humanos. El Cd sigue su curso hasta el medio ambiente, como al suelo y los ríos, principalmente a través de actividades industriales o fertilizantes que aplica los productores (Bolan, et al. 2013); Debido al consumo diario, el Cd en los granos de arroz plantea un problema de salud latente para los humanos a través de las cadenas alimentarias y conduce a una toxicidad crónica (Shah, et al. 2018).

Cd ha sido considerado como un metal tóxico y pesado (Torres, et al. 2018) que subsiste en una cantidad significativa por los pesticidas industriales que son incorporados al suelo por elementos que contienen fósforo (Marcano 2011). Esta situación pone en riesgo el medio ambiente ya que afecta la salud del hombre y animales y contamina los suelo y aguas; por lo tanto, es un factor negativo para el sector ambiental, ya que contaminan el medio y son difíciles de descomponer (Campos 1990).

El *O. sativa* es eficiente para absorber Cd. La bioconcentración de suelo a grano para el arroz es 0,300-1,112 mg kg⁻¹ (Song, et al. 2015). El consumo de arroz podría afectar severamente la ingesta de metales por el ser humano (Hu, et al. 2009). El Cd del arroz ingresa por el sistema radicular a las partes vegetativas y granos (Schreiber y Franke 2001).

Ante esta problemática, los microbios del suelo juegan un rol esencial al afectar las características del suelo y desarrollo del vegetal que influye significativamente en la absorción de metales pesados. Es conveniente usar microorganismos; empleándose en este caso las micorrizas arbusculares (MA) con capacidad de inmovilizar el cadmio en el sistema suelo-planta mediante estrategias de inmovilización y absorción de metales en las hifas (Janeeshma, et al. 2020).

Considerándose que existen muchas limitaciones y escasas tecnologías en la biorremediación del arroz; se ha planteado el siguiente problema general:

PG: ¿De qué manera influye los suelos contaminados con cadmio en la presencia de micorrizas arbusculares y contenido de clorofila en plántulas de “arroz” *Oryza sativa* en San Martín?; así mismo se formularon los siguientes problemas específicos:

PE1: ¿Cuáles son los niveles del cadmio en raíces y hojas de plántulas de *Oryza sativa* sembradas en suelos contaminados con cadmio en la Región San Martín?

PE2: ¿Cuál es el número de esporas y colonización micorrízica en plántulas de *Oryza sativa* sembradas en suelos contaminados con cadmio?

PE3: ¿Cuál es el contenido de clorofila en plántulas de *Oryza sativa* sembradas en suelos contaminados con cadmio?

Del mismo modo se plantea como Justificación social enfocado a todos los sectores de la sociedad, en este sentido se

pretende concientizar sobre el valor potencial de las micorrizas arbusculares y su efecto en la biorremediación del arroz; toda vez que somos conocedores de la necesidad de productos químicos que requiere el cultivo; por lo tanto, la aplicación de pesticidas estaría generando una incorporación de cadmio cultivares de arroz que podría generar toxicidad a largo plazo en la población ya que día a día consumimos arroz en diferentes tipos de preparado. Seguido la Justificación metodológica, se justifica metodológicamente porque se van a tratar enfoques actuales para mejorar y mitigar los contenidos de cadmio y minimizar el riesgo en la salud y la contaminación ambiental. Al mismo tiempo que existen los recursos científicos, llámese artículos, manuales, etc que nos permitirán fortalecer y discutir metodologías validados. Por eso

la Justificación económica el estudio se justifica en la investigación de métodos que sean factibles y de bajo costo, así como el aprovechamiento de microorganismos que fácilmente es utilizado por los productores; debido a la facilidad de multiplicar y aplicar a las plantas. Otra de las razones radica a que estos microorganismos se encuentran en todos los suelos en mínimas cantidades; siendo fuente para la obtención y propagación masiva para su uso permanente.

Esta investigación planteó el objetivo general sustentada, OG: Evaluar la influencia de suelos contaminados con cadmio en la presencia de micorrizas arbusculares y contenido de clorofila en plántulas de “arroz” *Oryza sativa* en la Región San Martín así mismo se formularon los siguientes, seguidamente se formuló los siguientes objetivos específicos:

OE1: Evaluar los niveles del cadmio en raíces y hojas de plántulas de *Oryza sativa* sembradas en suelos contaminados con cadmio en la Región San Martín San Martín,

OE2: Evaluar el número de esporas y colonización micorrízica en plántulas de *Oryza sativa* sembradas en suelos contaminados con cadmio.

OE3. Determinar el contenido de clorofila en plántulas de *Oryza sativa* sembradas en suelos contaminados con cadmio.

La hipótesis del trabajo se fundamenta en:

HG: Las micorrizas arbusculares y el contenido de clorofila se ven afectados por los niveles de cadmio en suelos en plantas de “arroz” (*Oryza sativa*) en la Región San Martín.

Asimismo, el proyecto planteó como hipótesis específicas lo siguiente:

HE1: Existe mayor contenido de cadmio en raíces y hojas de plantas de *Oriza sativa* en suelos con mayor concentración de cadmio en la Región San Martín.

HE2: Existe menor número de esporas y colonización micorrízica en plántulas de *Oryza sativa* a mayor concentración de cadmio en suelos.

HE3: Existe menor contenido de clorofila en hojas de plántulas de *Oryza sativa* a mayor concentración de cadmio en suelos.

II. MARCO TEÓRICO

El siguiente capítulo se presenta resúmenes con alcances nacionales e internacionales y fundamentos teóricos enmarcados en el tema de estudio.

Campos (2019) estudió el manejo agronómico de *O. sativa* en La Libertad. Prepararon y monitorearon tierras donde sembraron el cereal; aplicaron riegos, fertilizaron frecuentemente y control manual de manejo de plagas y malas hierbas en el cultivo en todo el proceso de desarrollo, rendimiento promedio y costos de producción. Los datos se obtuvieron por encuestas en los a los productores en los mismos predios. Para el control de insectos plagas emplearon extractos de ajo y ají principalmente al igual que extractos de ficus, al mismo tiempo control biológico con *Bacillus thurigiensis* cuya finalidad fue reducir insectos de Noctuidos; para reducir las enfermedades usaron *Trichoderma viridae* y *Bacillus subtilis*. El rendimiento que obtuvieron para el arroz orgánico fue de 6,100 kg/ha. con un costeo productivo de S/. 10,935 /Ha. Como conclusión indicaron que la mayoría de los productores de la asociación usan guano de gallina, guano de isla y productos orgánicos producidos de algas.

Alva (2019) masificó esporas de micorrizas arbusculares en plantas hospederas conformadas por gramíneas en Morales, Perú. Este estudio fue desarrollado en macetas a nivel de vivero, empleando arroz, sorgo y maíz, a partir de consorcios procedente de zonas de San Martín. Para el estudio usó el Diseño Completo al Azar con tres factores y 3 repeticiones. Aisló, cuantificó e identificó morfotipos de HMA. Los resultados logrados indicaron que el cultivo hospedero óptima para la masificación de HMA es el *O. sativa*, con 1176 esporas; al mismo tiempo identificaron 11 morfotipos diferentes debido a una diversidad de especies micorrízicas; siendo la procedencia de El Dorado el mejor con un porcentaje de 21,6 %. El autor concluyó que la masificación de HMA es predominantemente favorable empleando *O. sativa* como hospedero.

Zia-ur-Rehman et al. (2021), evaluaron el efecto del biocarbón y el compost sobre la biodisponibilidad de cadmio y su absorción por el sistema de cultivo de arroz-trigo

regado con aguas residuales no tratadas: un estudio de campo, desarrollado en la ciudad de Multan, Pakistan. Para este propósito, aplicaron tres enmiendas orgánicas (biocarbón de paja de trigo (WSB), biocarbón de palo de algodón (CSB) y compuesto de compost) al 0,5% (bajo un diseño de bloques al azar con 4 réplicas) en suelos contaminados con Cd alimentados con aguas residuales para Bloqueo efectivo de Cd en suelos cultivados con trigo y arroz. El experimento se llevó a cabo en un año. Los resultados obtenidos revelaron que todas las enmiendas pueden mejorar el desarrollo de las plantas y disminuir el Cd biodisponible del suelo. Los autores concluyeron que WSB puede mejorar el rendimiento de paja (29,20 y 26,78 % para trigo y arroz) y el rendimiento de grano (22,69 % y 26,70 %) y presumir de todos los atributos fisiológicos (contenido de clorofila, conductancia estomática/subestomatal, fotosíntesis y tasa de transpiración). La aplicación de WSB disminuyó el contenido de Cd biodisponible en el suelo poscosecha después de los cultivos de trigo y arroz. Económicamente, la aplicación de enmiendas en cultivos de trigo aumenta su costo, por lo que se observó que la relación costo-beneficio es menor a 1. Pero para las próximas temporadas de cultivo,

Wang Yutao, Bao Xiaozhe, Li Shaoshan. (2021), estudiaron el potencial de las micorrizas en el desarrollo del arroz bajo diferentes regímenes de inundación y sombra, realizado en el sur de China. Con base en dos experimentos de invernadero, examinaron la respuesta del crecimiento del arroz a los HMA bajo diferentes regímenes de inundación y/o sombra para estudiar los efectos regulatorios de la inundación en las respuestas de micorrizas de las plantas de arroz bajo diferentes condiciones de luz. Los datos de porcentaje de colonización de HMA lo transformaron a $(\arccos(x))^{1/2}$ para lograr la homogeneidad de las varianzas antes de realizar un análisis de varianza. La normalidad de los datos lo determinaron por la prueba de Kolmogorov-Smirnov, siguiendo diferentes pruebas paramétricas. Estadísticamente los análisis fueron pasadas por el SPSS 20.0. Los HMA tuvo efectos positivos o neutrales en el crecimiento y los rendimientos de las dos variedades de arroz probadas en condiciones sin inundación, pero los suprimió en todos los regímenes de inundación y/o sombra, lo que enfatiza la gran importancia de las condiciones de inundación y

sombra para determinar los efectos de las micorrizas. Análisis posteriores indicaron que la inundación y el sombreado redujeron la colonización de AMF y la densidad de hifas extrarradicales (EHD), lo que implica una posible reducción de la inversión de carbono del arroz a HMA. Los autores concluyeron que tanto la inundación como el sombreado modularon el resultado de la simbiosis de AMF para las plantas de arroz, en parte al influir en el beneficio de P micorrizal. Este hallazgo tiene implicaciones importantes para la aplicación de AMF en la producción de arroz.

Umed. *et al.* (2020), midieron la influencia del pH en la acumulación de cadmio en plántulas de arroz (*Oryza sativa* L.) en china. Aquí, se realizó un experimento hidropónico para caracterizar la relación entre la acumulación de Cd y el pH del medio en plántulas de los dos cultivares, Zhonjiazao17 (ZJZ17) y Xiangzhengyu (XZY). Las captaciones de Cd por las raíces de ambos cultivares y su translocación a los brotes fueron las más altas a partir de un medio de pH 6,0. Las plantas XZY acumularon más Cd que las ZJZ17. Los resultados se presentan en medias \pm desviaciones estándar (DE) de tres réplicas biológicas independientes. Las diferencias entre tratamientos fueron analizadas por la varianza de tres vías (ANOVA, $p < 0,05$), seguido de la prueba LSD en SPSS Statistics para Windows, v21.0 (IBM Corp., Armonk, NY, EE. UU.). Tanto la concentración de Cd del medio como su pH ejercieron efectos significativos sobre el crecimiento de las plántulas. A pH 6,0, el zinc se transportó eficientemente, pero la translocación de hierro se suprimió en los brotes. Los autores concluyeron que los genes, *OsZIP5* y *OsYSL15*, son los responsables más probables de la absorción y translocación de estos dos elementos en las plántulas de arroz.

Fengge *et al.* (2019), en su publicación sobre los efectos sinérgicos de micorrizas arbusculares (HMA) y uso de biocarbón en el crecimiento y la absorción de metales pesados, evaluaron el impacto de los HMA y el biocarbón en los niveles de cadmio en "alfalfa" *Medicago sativa* L., llevado a cabo en la ciudad de Xinghua, China. Emplearon arena de río y suelo (arena / suelo, 1: 2) para el experimento. Este experimento tuvo un diseño factorial $2 \times 2 \times 2$ con adición de cadmio, enmienda de biocarbón e

inoculación de HMA dispuestas en un DCA “Diseño completamente al azar” conformado por 04 repeticiones. El ensayo lo constituyeron por dos concentraciones de Cd (0 y 20 ppm), dos tratamientos en base a biocarbón (0 y 3 %, p: p) y dos tratamientos de inoculación de HMA (no micorrízicos control, inoculación de HMA). Las ocho combinaciones lo utilizaron en la configuración experimental: sin HMA, HMA, biocarbon (BC), HMA + BC, Cd, AMF + Cd, BC + Cd y HMA + BC + Cd. Los resultados resaltan que con la inoculación de HMA y la enmienda de biocarbón mostraron niveles más bajos de Cd en los brotes, y los niveles más altos de N en el tejido vegetal y Contenido de P en el grupo de adición de Cd. Los autores concluyen que el uso combinado de inoculación de HMA y biocarbón como enmienda tuvo efectos sinérgicos significativos en la absorción de nutrientes y baja presencia de cadmio.

Rask *et al.* (2019), hace mención de las esporas de micorrizas arbusculares en el movimiento del cadmio y su efecto en el posicionamiento de las micorrizas en las raíces de las plantas, y cómo las especies de vegetales colonizados por MA afectaron la absorción, y toxicidad del Cd en los vegetales. Estudio realizado en Dinamarca en un invernadero con seis especies de plantas en macetas con siete concentraciones de Cd: Una planta altamente micorrízica, *Hordeum vulgare* L. var. Evergreen (colonización > 50 %), dos con colonización micorrízica moderada, *Linum usitatissimum* L. (20-50 % de colonización) y *Sorghum bicolor* L. (20-50 % de colonización), uno con baja colonización, *Matricaria recutita* L. (<25 % de colonización), y dos plantas no micorrízicas, *Sinapis alba* L. (sin colonización) y *Dianthus deltoides* L. var. Erectus (sin colonización). Las plantas lo cosecharon destructivamente después de dos meses. Las raíces de cada maceta lo limpiaron con agua, lo cortaron en trozos de 1 cm, lo aleatorizaron y lo dividieron en dos submuestras: una para Medición de Cd y uno para análisis de colonización micorrízica. Las raíces y los brotes lo secaron a 105 ° C durante 24 horas. El material vegetal (0,5 g DW raíces y 1,0 g Brotes DW) lo enviaron a un sistema de digestión por microondas MARS 6 (CEM Corporation) con 10 ml de ácido nítrico al 32,5% (HNO₃) en tubos de teflón. La concentración de Cd de las muestras lo midieron utilizando un espectrómetro de absorción atómica (AAS) (PinAAcle™ 900T, Perkin Elmer, Estados Unidos). Las

raíces y los brotes lo secaron a 105 ° C durante 24 horas, luego la raíz lo aclararon con KOH al 10 % y lo tiñeron con azul de tripano al 0.05 % empelando el método modificado de Phillips y Hayman (1970). Los análisis de correlación y regresión lineal lo realizaron en SigmaPlot 13.0, y los análisis de variación en SAS Enterprise Guide 6.1. Sus resultados indican que la simbiosis redujo la translocación de Cd a los brotes, especialmente en plantas con una colonización de HMA muy alta. Los autores concluyeron que la interacción de especies de vegetales y la colonización de MA favorece grandemente la absorción de Cd en las plantas. Por lo tanto, la MA deben ser considerados cuando se cultivan plantas en zonas con presencia de este elemento.

Las teorías relacionadas al tema se precisan a continuación:

El cadmio (Cd) está ampliamente distribuido en los suelos agrícolas y entra la cadena alimentaria a través de varios cultivos, amenazando así la salud humana (Ding, et al., 2013; Li et al. 2017). El arroz (*O. sativa*) es de preocupación particular en las regiones donde es el alimento básico como cereal granos que contribuyen en gran parte al consumo dietético con arroz estar en primer plano (Meharg, et al. 2013). San Martín es uno de las principales regiones de mayor producción de arroz; sin embargo, podrían estar contaminados con cadmio y afectar a la salud humana ya que el Cd ingesta para la población general (Song, et al. 2017). A largo plazo El consumo de arroz contaminado con Cd puede causar graves daños a la salud humana (Chen, et al. 2018). Por lo tanto, la contaminación por Cd en las áreas con cultivares de arroz podría convertirse en un problema importante de seguridad alimentaria.

El suelo es el principal sumidero de metales y actúa como barrera para evitar su entrada en la cadena alimentaria (Yasir, et al. 2019). Sin embargo, malas prácticas agrícolas como la minería y la fundición de metales han transferido gradualmente muchos metales tóxicos de la corteza terrestre al medio ambiente, lo que ha provocado la propagación y contaminación de metales pesados (Sinha, et al. 2013).

Se han utilizado diversas técnicas físicas, químicas y biológicas para disminuir metales pesados en suelos contaminados (Yasir, et al. 2019). La inmovilización *in situ* generalmente se considera una técnica factible para corregir suelos contaminados de metales debido a su rentabilidad y facilidad de operación (Zeng, et al. 2017). Muchos investigadores han informado sobre el uso de diversas enmiendas para inmovilizar el Cd en suelos contaminados, incluidos fosfatos, minerales arcillosos, materiales calcáreos, etc. (Cui, et al. 2011). Los microorganismos son materiales vivos con diversas propiedades. Se han investigado algunas bacterias y hongos para remediar suelos y agua contaminados (Yang, et al. 2017). El proceso de simbiosis generado por las micorrizas arbusculares (MA) afecta ≤ 80 % de los vegetales, siendo muchos de ellos cultivares de pan llevar (Wipf, et al. 2019).

III.METODOLOGÍA

3.1. Tipo y diseño de investigación

3.1.1. Tipo de investigación

Fue del tipo aplicada debido a que abordó principios de validación del ensayo a nivel de vivero mediante la investigación científica de tal manera ayude a resolver problemas de inmediato (Cortés y Iglesias 2004). Se consideró formatos para la toma de datos que se adjuntan en el apéndice. La investigación aplicada consiste en generar tecnologías, protocolos y estudios ya validados de tal manera se puedan aplicar y replicar para una producción a escala piloto o masivamente.

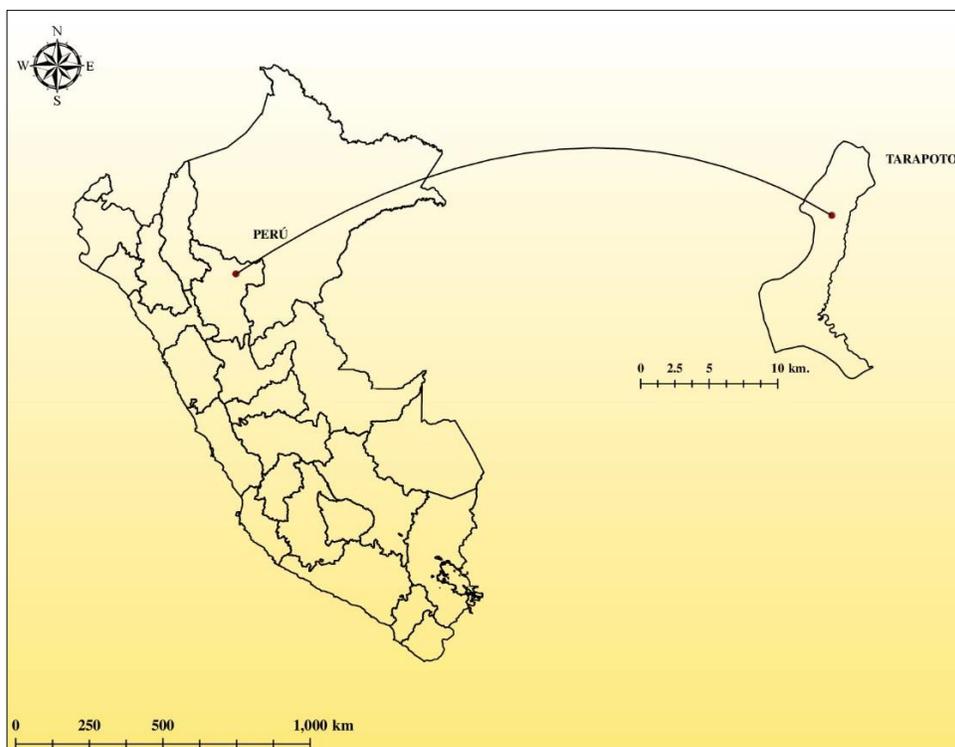
3.1.2. Diseño de investigación

Presentó un modelo experimental, al comparar la influencia del cadmio en la micorrización y presencia de clorofila en vegetales de arroz. Según Baena (2017), ensayos con diseños experimentales involucra la manipulación de factores dependientes estudiados; siendo en este caso el cadmio y los hongos micorrízicos arbusculares.

La presente investigación tuvo lugar en un vivero del distrito de Tarapoto (Figura 1), entre abril a junio del 2022. La ciudad de Tarapoto presenta una altitud de 356 m.s.n.m. la temperatura casi siempre fluctúa entre los 21 °C a 34 °C y y pocas veces baja por debajo de 20 °C; por lo que siempre está por encima de 37 °C, presenta una precipitación promedio de 119 mm por mes, y una humedad relativa superior al 80 % durante el año

Figura 1

Mapa del ámbito de ejecución de la investigación



Nota. Ubicación del estudio en la localidad de Tarapoto, San Martín

Fuente: Elaboración propia (2022).

3.2. Variables y operacionalización

Variable independiente: Se empleó dos niveles de cadmio con proporciones de 0 y 0,8 mg/kg de suelos en maceteros de capacidad para 3 kg de sustrato; asimismo, se hará uso de dos concentraciones de hongos micorrízicos arbusculares (Vallejos-Torres et al., 2022).

Variable dependiente: Se empleó diferentes indicadores de medición del estudio, siendo estas:

- Conteo de esporas de HMA
- Colonización micorrízica

- Contenido de clorofila
- Cd en raíces
- Cadmio en hojas

En el Anexo 1 se muestra las variables identificadas, estructurados de acuerdo a los objetivos específicos; asimismo, se muestra los medios de registro y unidades de medida para cada variable evaluado.

3.3. Población (criterios de selección), muestra, muestreo

3.3.1. Población

Se utilizó cuatro tratamientos y tres repeticiones con sustratos en base a tierra agrícola mezclada con arena esterilizada en autoclave con una proporción de 3 volúmenes de tierra y uno de arena vaciadas a cada macetero de 3 kg. Se emplearon tres plantas de arroz por macetero; por lo tanto, la población estuvo conformada por 36 plantas de arroz.

3.3.2. Muestra

Formada por dos plantas de arroz evaluada por macetero; teniéndose un total de 24 plantas de arroz de las cuales se midieron 12 análisis de cadmio en raíces y 12 en hojas de arroz. Asimismo, se midieron 12 muestras para conteo de esporas y 12 para colonización micorrízica.

3.3.3. Muestreo

Se implementó un estudio con 12 sub muestras experimentales por unidad experimental estuvo conformado por tres plantas de arroz para cada tratamiento. Las plantas fueron sembradas en maceteros de 3 kg con sustratos contaminados con cadmio, por un tiempo de 80 días. Durante el estudio y desarrollo de las plantas fueron regadas con agua a capacidad de campo, cuyo objetivo fue mantener la humedad en el sustrato de forma uniforme para facilitar la dispersión del cadmio y el manejo de los hongos micorrícicos depositados.

3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

La colecta de la información, datos y otros se realizó siguiendo las características de la investigación, para ello se empleó un formato elaborado en Excel con la distribución de muestras donde se vaciarán los datos de análisis de cadmio de muestras de raíces y hojas, colonización y conteo de esporas y contenido de clorofila en plantas de arroz establecido en suelos contaminados con cadmio. Para la validación del formato se emplearon metodologías propuestas en artículos científicos publicadas en revistas indexadas.

3.5. Procedimientos

3.5.1. Características del suelo por tratamiento

El estudio involucró el empleo de cuatro análisis físicos químicos a partir de muestras de suelo colectados en cada tratamiento al finalizar la investigación. La muestra de suelo se colectó haciendo uso de paleta mediana introducido en forma de “V”, luego se uniformizó en una mezcla de 1 kg de suelo que fue depositado en una bolsa plástica transparente con el rotulado respectivo, indicando la denominación de tratamiento tomado en vivero; cuyo detalle de los tratamientos se muestran en la Tabla 1. El muestreo se tomó de cada macetero uniformizando los suelos con la finalidad de lograr una muestra compuesta para cada tratamiento (Ministerio del Ambiente [MINAM] (2014).

Tabla 1

Característica fisicoquímica de los tratamientos estudiados

Tratamientos	pH	MO (%)	CIC	P (mg kg ⁻¹)	C.E. μ S/cm
T ₁	6,52	2,46	5,7	5,12	182,6
T ₂	7,18	1,12	8,7	6,86	396,2

T ₃	7,19	1,71	8,1	7,12	275,6
T ₄	7,45	2,86	8	7,36	297,6

Nota. Características de los sustratos muestreados por tratamiento.

3.5.2. Preparación y esterilización de arena y tierra agrícola

Se preparó un sustrato en base a tres volúmenes de tierra agrícola y uno de arena media de río. La arena fue desinfectada con hipoclorito de sodio al 2%; inmediatamente después se esterilizó en autoclave por un tiempo de 2,5 horas, luego (Figura 2). El mismo proceso siguió el sustrato en base a tierra, estos fueron depositadas en bolsas transparentes de cristal y depositadas en autoclave para su esterilización; de tal manera se tenga un sustrato libre de patógenos o microorganismo que pudieran alterar los resultados (Vallejos-Torres, et al. 2019).

Figura 2

Preparación del medio de crecimiento para el estudio



Nota. (A), Tamizado de sustratos y (B), uniformización de arena y tierra agrícola.
Fuente: Elaboración propia (2022).

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

Los sustratos recibieron dos proporciones de Cd: 0 y 5 mg.kg⁻¹. El elemento fue vaciado lentamente a los suelos de acuerdo a los tratamientos en estudio. A partir de una solución madre de Cd se realizó la formulación de la dosis requerida para la incorporación al medio. Los sustratos fueron pesados en bolsas transparentes cristalizadas con una proporción de 3 kilogramos para cada bolsa; luego se incorporó el Cadmio (Figura 3). El suelo con cadmio se secó al aire libre, y se realizaron dos mezclas para promover la uniformidad del combinado (Vallejos-Torres, et al. 2022).

Figura 3

Preparación del cloruro y su incorporación a los sustratos



Nota. (A) Proceso de llenado con sustratos en bolsas de cristal y (B), Inoculación con cloruro de cadmio en sustratos. Fuente: Elaboración propia (2022).

3.5.4. Multiplicación de HMA

Se cuenta con un consorcio de micorrizas arbusculares que fueron multiplicados anteriormente en cultivos hospederos de arroz por un periodo de 80 días incluyendo 30 días cuya finalidad fue dejar sin agua a la planta para facilitar la multiplicación de esporas de HMA (Del Águila *et al.*, 2018) (Figura 4).

Figura 4

Multiplicación de micorrizas arbusculares



Nota. (A) Proceso de multiplicación de hongos micorrízicos arbusculares utilizando arroz como cultivo hospedero. Fuente: Elaboración propia (2022).

3.5.5. Aplicación con esporas de HMA a plántulas

Semillas de arroz fueron colectadas en bandejas germinadoras con sustrato esterilizada en base a dos proporciones de tierra agrícola y una de arena. Después de los 15 días fueron repicadas en los maceteros con el medio de crecimiento detallado anteriormente, al que se incorporaron los hongos micorrízicos arbusculares (HMA) en un numero de 2000 esporas (Vallejos-Torres, et al. 2021) (Figura 5). La inoculación se realizó en maceteros de 3 kg cada uno con hipoclorito de sodio al 2 %, seguidamente

se procedió a seleccionar y repicar las plántulas con germinación uniforme, luego se incluyó las esporas de HMA y finalmente se procedió a regar con agua tratada, a nivel de capacidad de campo (Vallejos-Torres, et al. 2022). Para su posterior monitoreo y evaluación continua durante el desarrollo de plantas de arroz.

Figura 5

Germinación y repique de semillas de arroz



Nota. (A), Germinación de semillas de arroz en bandejas y (B), Repique de plántulas de arroz en macetas inoculadas con cadmio y HMA. Fuente: Elaboración propia (2022).

3.5.6. Proceso de destrucción de plantas

La destrucción de plantas se realizó 80 días después de repicado como plántulas, en la cual fueron extraídas todas las plantas por tratamiento de sus respectivos sustratos cuidadosamente para no dañar las raíces (Figura 6). Luego las plantas fueron separadas en dos partes, aérea y radicular, y fueron cuidadosamente rotuladas y preparadas para ser enviadas al laboratorio para su respectivo análisis (ver Apéndice 3 y 5).

Figura 6

Evaluación de la morfología del arroz (raíces y hojas)



Nota. (A), Sistema radicular de plantas de arroz con hongos micorrícicos arbusculares y (B), Plantas de arroz muestreadas para los análisis de cadmio. Fuente: Elaboración propia (2022).

3.6. Análisis de datos

Se validó por la normalidad y homocedasticidad la base de datos por las pruebas de Shapiro Wilk y Breusch-Pagan, respectivamente. Para comprobar la interacción de los factores; los datos ingresaron por el análisis de varianza y sometido a pruebas de Tukey con una probabilidad de error al 5 %. La data se analizó utilizando el programa R ver. 4.0.2. El estudio de investigación estuvo constituido por cuatro tratamientos con ocho repeticiones por cada tratamiento y conformado por un arreglo bifactorial: 2A (Consortios de HMA) x 2B (Dosis de cadmio), haciendo un total de cuatro tratamientos clasificados de la siguiente manera: T1: Sin HMA y Cd; T2: HMA; T3: Cadmio; T4: HMAxCadmio (Tabla 2).

Tabla 2

Distribución de tratamiento en el experimento

Tratamiento	Clave	HMA	Cadmio (mg kg ⁻¹)
T ₁	Sin HMA, Cd	Sin HMA	0 (Control)
T ₂	HMA	Con HMA	0
T ₃	Cadmio	Sin HMA	5
T ₄	HMA*Cadmio	Con HMA	5

Fuente: Elaboración Propia (2022)

3.7. Aspectos éticos

Este estudio fue desarrollado mediante citas adecuadas y fuentes leales de revistas indexadas, en la cual se respetó las citas de los autores, teniendo en cuenta la referencia del manual de ISO 690 de la Universidad César Vallejo garantizando una investigación confiable, así como también respetando la RVI-N°011-2020 Aprueba la guía de elaboración de TI y Tesis, RCU N° 0262-2020 Aprueba la actualización del código de ética de investigación.

IV. RESULTADOS

4.1. Niveles del cadmio en raíces y hojas de plántulas de *Oryza sativa* sembradas en suelos contaminados con cadmio

4.1.1 Niveles del cadmio en raíces de plántulas de *Oryza sativa* sembradas en suelos contaminados con cadmio

Análisis de varianza

El ANOVA (Tabla 3) para el Cd en el cultivo de arroz en cuatro tratamientos probadas, evidencia que hay alta significancia en todos los tratamientos aplicados. Aceptándose por tanto que el cadmio se ve influenciada enormemente con la aplicación de hongos micorrícicos arbusculares. Se obtuvieron un grado de confiabilidad (R^2) de 99,00 %, un coeficiente de variación (CV) de 4,13 %.

Tabla 3

Análisis de varianza

	F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo		10,58	3	3,53	397,21	<0.0001
Inóculo de HMA		0,2	1	0,2	22,35	0,0015
Cadmio (ppm)		10,29	1	10,29	1159,83	<0.0001
HMA*Cadmio		0,08	1	0,08	9,46	0,0152
Error		0,07	8	0,01		
Total		10,65	11			

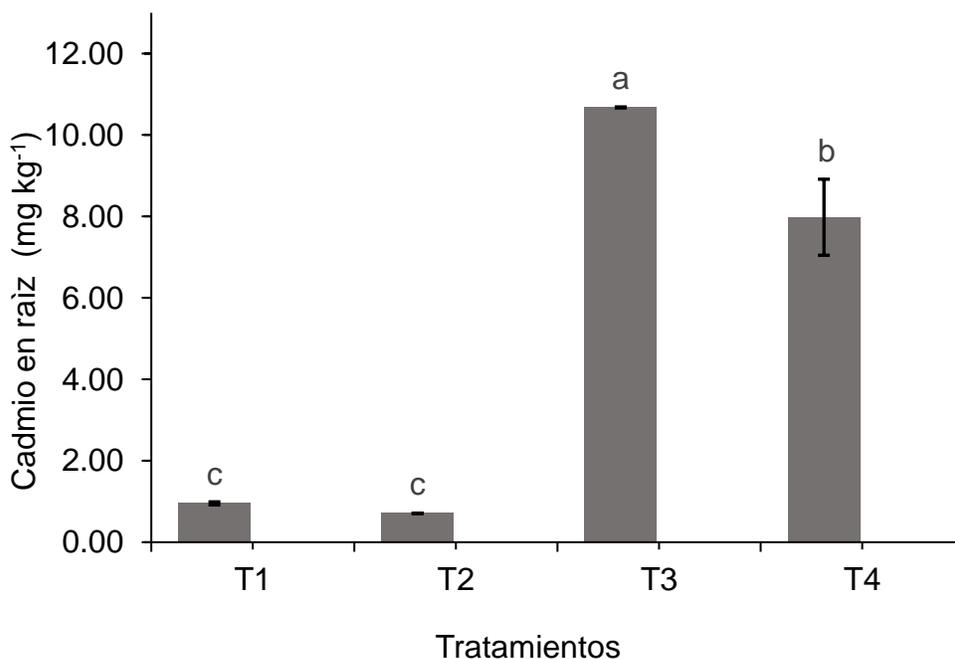
$R^2 = 99\%$; CV = 4,13%

Prueba de Tukey

El contenido de Cd fue mayor cuando se aplicó Cd a sustratos (5 mg kg^{-1}), logrando llegar a $10,68 \text{ mg kg}^{-1}$ en promedio (T3), seguido por el tratamiento combinado entre HMA*Cadmio con un promedio de Cd en raíces de $7,98$ (T4). Los más bajos valores de Cd se presentaron en el T2 y T1 con aplicación de HMA y sin aplicación de HMA con valores de $0,71$ y $0,95$ respectivamente (Figura 7).

Figura 7

Efectos de la inoculación de HMA y adición de Cd sobre el cadmio en raíces de plantas de arroz en suelos contaminados con cadmio



Nota. Las letras minúsculas indican las diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,05$). Fuente: Elaboración propia (2022).

4.1.2 Niveles del cadmio en hojas de plántulas de *Oryza sativa* sembradas en suelos contaminados con cadmio

Análisis de varianza

El ANOVA (Tabla 4) para el Cd en el cultivo de arroz de los cuatro tratamientos en estudio, evidencia que hay alta significancia en la aplicación de Cd y la combinación de HMA*Cd. Aceptándose por tanto que el cadmio se ve influenciada enormemente con la aplicación de hongos micorrícicos arbusculares. Se logró un coeficiente de correlación (R^2) de 99,00 %, un coeficiente de variación (CV) de 1,66 %.

Tabla 4

Análisis de varianza

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0,79	3	0,26	486,43	0.0001*
Inóculo de HMA	1,70E-07	1	1,70E-07	3,20E-04	0,9861NS
Cadmio (ppm) DT	0,78	1	0,78	1441,15	0.0001*
HMA*Cadmio	0,01	1	0,01	18,12	0,0028*
Error	4,30E-03	8	5,40E-04		
Total	0,79	11			

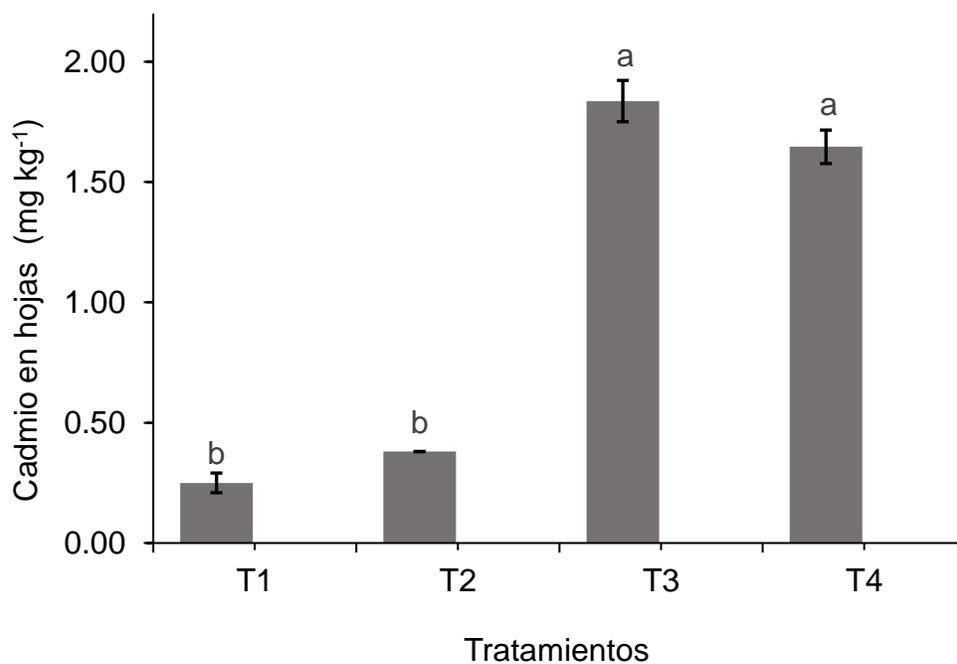
$R^2 = 99\%$; CV = 1,66%

Prueba de Tukey

El contenido de Cd fue mayor cuando se aplicó Cd a sustratos (5 mg kg^{-1}), logrando llegar a $1,84 \text{ mg kg}^{-1}$ en promedio (T3), seguido por el tratamiento combinado entre HMA*Cadmio con un promedio de Cd en hojas de 1,65 (T4). Los más bajos valores de Cd se encontraron en el T1 y T2 con aplicación de HMA y sin aplicación de HMA con valores de 0,25 y 0,38 respectivamente (Figura 8).

Figura 8

Efectos de la inoculación de HMA y adición de Cd sobre el cadmio en hojas de plantas de arroz en suelos contaminados con cadmio



Nota. Las letras minúsculas indican las diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,05$). Fuente: Elaboración propia (2022).

4.2. Número de esporas y colonización micorrícica en plántulas de *Oryza sativa* sembradas en suelos contaminados con cadmio.

4.2.1. Número de esporas de HMA en plántulas de *Oryza sativa* sembradas en suelos contaminados con cadmio.

Análisis de varianza

El análisis de varianza (ANOVA) (Tabla 5) para las esporas de HMA en cuatro tratamientos en estudio, se aprecia que existe diferencias significativamente altas con la inoculación de HMA. Aceptándose por lo tanto, que la cantidad de esporas se ve influenciada enormemente con la aplicación de hongos micorrícicos arbusculares. Obtuvimos un coeficiente de correlación (R^2) de 99,00 %, un coeficiente de variación (CV) de 14,03 %.

Tabla 5

Análisis de varianza

	F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo		1480,42	3	493,47	206,27	<0.0001
Inóculo de HMA		1204,95	1	1204,95	503,67	<0,0001
Cadmio (ppm)		137,73	1	137,73	57,57	0.0001
HMA*Cadmio		137,73	1	137,73	57,57	0,0001
Error		19,14	8	2,39		
Total		1499,55	11			

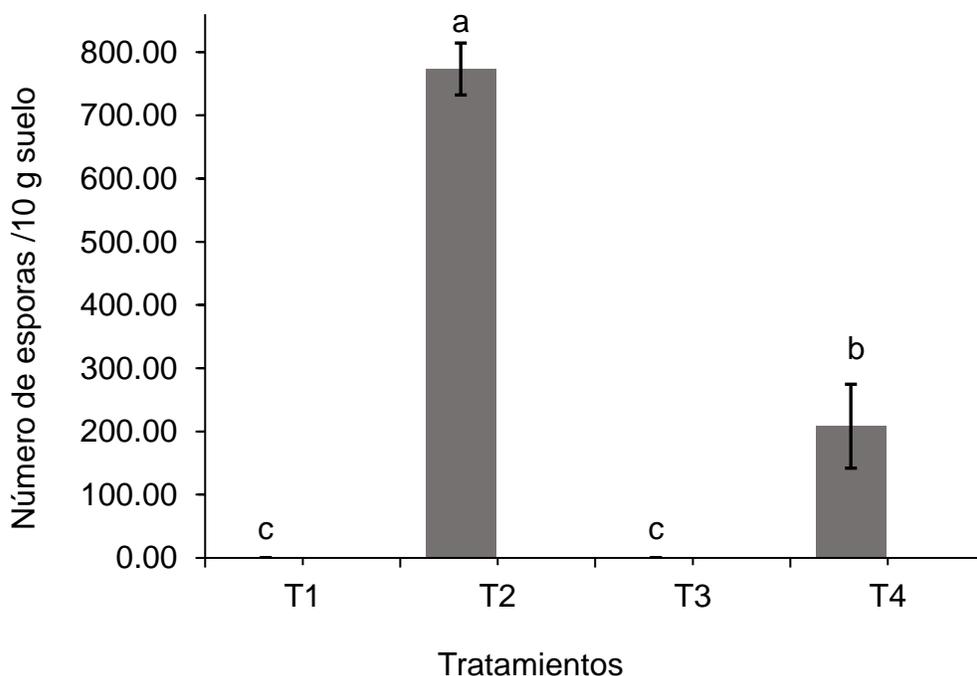
$R^2 = 99\%$; $CV = 14,03\%$

Prueba de Tukey

El número de esporas de hongos micorrízicos arbuscular fue mayor cuando solo se aplicaron HMA a sustratos sin aplicación de cadmio en plantas de arroz, logrando llegar a 773,33 esporas en promedio (T2) y el tratamiento combinado entre HMA*Cd mostró 208,33 esporas (T4), mostrando diferencias significativas entre ambos tratamientos (Figura 9). Los tratamientos que no fueron inoculados con HMA no mostraron presencia d esporas de HMA en ninguno de sus tratamientos (T1 y T3).

Figura 9

Efectos de la inoculación de HMA y adición de Cd sobre el número de esporas en plantas de arroz.



Nota. Las letras minúsculas indican las diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,05$). Fuente: Elaboración propia (2022).

4.2.2. Colonización micorrízica en plántulas de *Oryza sativa* sembradas en suelos contaminados con cadmio.

Análisis de varianza

El ANOVA (Tabla 6) para la colonización en los cuatro tratamientos en estudio, evidencia que hay diferencias altamente significativas con la inoculación de HMA. Demostrándose que la colonización se ve influenciada enormemente con la aplicación de hongos micorrícicos arbusculares. Los resultados indican un R^2 de 78,00 % y un CV de 4,85 %.

Tabla 6
Análisis de varianza

	F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo		6245,38	3	2081,79	1965,1	<0.0001
Inóculo de HMA		5402,75	1	5402,75	5402,75	<0,001
Cadmio (ppm)		421,32	1	421,32	397,7	<0.0001
HMA*Cadmio		421,32	1	421,32	397,7	<0,0001
Error		8,48	8	1,06		
Total		6253,85	11			

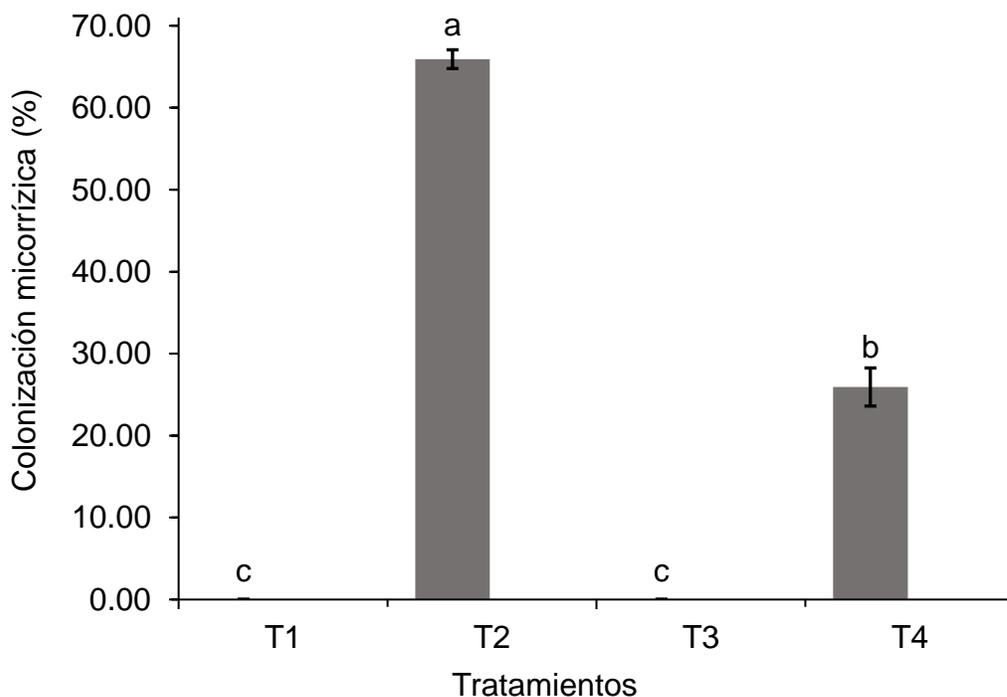
$R^2 = 78\%$; CV = 4,85%

Prueba de Tukey

La colonización micorrízica fue mayor cuando solo se aplicaron HMA a sustratos sin aplicación de cadmio en plantas de arroz, logrando llegar a 65,92% en promedio (T2) y el tratamiento combinado entre HMA*Cd mostró 25,93% (T4), mostrando diferencias significativas entre ambos tratamientos (Figura 10). Los tratamientos que no fueron inoculados con HMA no mostraron colonización en ninguno de sus tratamientos (T1 y T3).

Figura 10

Efectos de la inoculación de HMA y adición de Cd sobre la colonización micorrízica en plantas de arroz



Nota. Las letras minúsculas indican las diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,05$). Fuente: Elaboración propia (2022).

4.3. Contenido de clorofila en plántulas de *Oryza sativa* sembradas en suelos contaminados con cadmio.

Análisis de varianza

El ANOVA (Tabla 7) para el contenido de clorofila en el cultivo de arroz de los cuatro tratamientos en estudio, evidencia que hay diferencias altamente significativas solo en la aplicación de HMA. Aceptándose por tanto que la clorofila se ve influenciada enormemente con la aplicación de hongos micorrícicos arbusculares. Se lograron un R^2 de 78,00 % y un CV de 2,67 %.

Tabla 7

Análisis de varianza

	F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo		0,6	3	0,2	9,41	0.0053
Inóculo de HMA		0,46	1	0,46	21,66	0,0016
Cadmio (ppm)		0,13	1	0,13	6	0.0399
HMA*Cadmio		0,01	1	0,01	0,56	0,4757
Error		0,76	8	0,02		
Total		10,65	11			

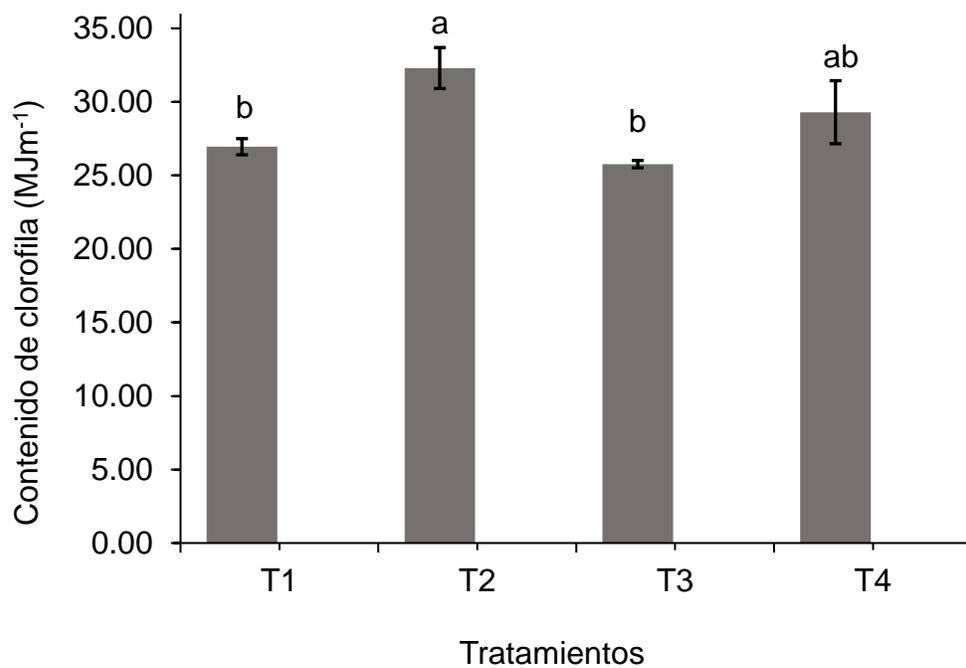
$R^2 = 78\%$; $CV = 2,67\%$

Prueba de Tukey

El contenido de clorofila fue mayor cuando se aplicaron HMA a sustratos sin aplicación de cadmio en plantas de arroz, logrando llegar a 32,30 en promedio (T2), seguido por el tratamiento combinado entre HMA*Cadmio con un promedio de clorofila de 29,30 (T4). Los menores valores de clorofila se encontraron en los tratamientos con aplicación donde no se aplicaron hongos micorrízicos arbusculares con valores de 26,95 y 25,77 en los tratamientos T1 y T3 respectivamente (Figura 11).

Figura 11

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



Nota. Las letras minúsculas indican las diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,05$). Fuente: Elaboración propia (2022).

V. DISCUSIÓN

5.1. Niveles del cadmio en raíces y hojas de plántulas de *Oryza sativa* sembradas en suelos contaminados con cadmio

5.1.1 Niveles del cadmio en raíces de plántulas de *Oryza sativa* sembradas en suelos contaminados con cadmio

El contenido de Cd fue mayor cuando se aplicó Cd a sustratos (T3), seguido por el tratamiento combinado entre HMA*Cadmio; sin embargo, los menores valores de Cd se encontraron en el T2 y T1 con aplicación de HMA y sin aplicación de HMA (Figura 7). Las concentraciones totales de Cd en el suelo utilizado fueron altas, lo que en consecuencia resultó en elevados contenidos de Cd en raíces de raigrás. Las concentraciones de Cd en raíces fueron mucho más altas que las hojas. Los resultados indica que la raíz tuvo un fuerte efecto de retención sobre Cd, impidiendo que sean transportados a las hojas (Meng, et al. 2021).

La absorción y traslado de Cd en el sistema suelo-arroz han sido bien estudiados. Los iones Cd se mueven hacia la raíz a través de las paredes celulares de la rizodermis, desde la solución del suelo hacia el cilindro vascular. Tanto la absorción de la raíz como el transporte de Cd de la raíz a las hojas estuvieron influenciados principalmente por factores ambientales (Chen, et al. 2018).

Resultados similares lo mostró Zihao, et al. (2021) donde tratamientos con Cd, la altura de planta, la longitud de la raíz y la relación raíz/hojas del maíz inoculado con hongos micorrízicos arbusculares disminuyeron con el aumento de la concentración más alta de Cd. El Cd tuvo efectos significativos en las variables indicadas para el maíz. La interacción del hongo micorriza arbuscular y el Cd tuvieron significancia en el crecimiento del cultivo y la longitud de la raíz y un efecto significativo sobre la biomasa de la raíz del maíz

5.1.2 Niveles del cadmio en hojas de plántulas de *Oryza sativa* sembradas en suelos contaminados con cadmio

El contenido de Cd fue mayor cuando se aplicó Cd a sustratos (T3), seguido por el tratamiento combinado entre HMA*Cadmio (T4). Sin embargo, los menores valores de Cd se encontraron en el T1 y T2 con aplicación de HMA y sin aplicación de HMA (Figura 8).

Los resultados de nuestro estudio ilustraron aún más las variaciones en la absorción y translocación de Cd en el arroz cultivar Conquista. Los cultivares de arroz con alta afinidad por el Cd del suelo respondieron a los altos niveles de Cd del suelo mediante la partición de una mayor proporción del Cd total de la planta en las raíces y las partes superiores de la planta. Los cultivares de arroz interfirieron la translocación del Cd a la parte superior del arroz, en particular la translocación de la raíz a la hoja. Uruguchi, et al. (2009) concluyó que la translocación de Cd de la raíz al brote a través del flujo de la xilema fue el principal proceso fisiológico que determinó la acumulación de Cd en brotes. Esto sugirió que exceder la translocación de Cd de la raíz a la hoja a través del flujo de la xilema condujo a una mayor acumulación de Cd en los tejidos vegetativos (Kanu, et al. 2017)

Nuestros resultados mostraron que la acumulación de Cd en los órganos del arroz se vio favorecida por procesos fisiológicos y expresiones genéticas; por lo tanto, la retención máxima de Cd en las raíces con menos translocación a las hojas constituye un mecanismo importante en la tolerancia al Cd. La capacidad del cultivar para retener Cd en las raíces puede contribuir a reducir la acumulación de Cd en el grano, lo cual es de gran importancia para la salud humana (Kanu, et al. 2017).

Tanto la absorción de la raíz como el transporte de Cd de la raíz a la hoja estuvieron influenciados principalmente por factores ambientales (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0147651320312574>Chen, et al. 2018). Por lo tanto, realizamos RDA para cuantificar la influencia relativa de las

variables ambientales (por ejemplo, propiedades fisicoquímicas del suelo y concentraciones de metales pesados) sobre el nivel del Cd en el sistema suelo-arroz. Los efectos del estrés por Cd y el pH del medio sobre el crecimiento de las plántulas de arroz. La inhibición del crecimiento de raíces inducida por Cd resulta en una baja potencia del cultivo absorber agua y nutrientes, lo que ralentiza el crecimiento del brote (Chen, et al. 2003).

5.2. Número de esporas y colonización micorrízica en plántulas de *Oryza sativa* sembradas en suelos contaminados con cadmio.

5.2.1. Número de esporas en plántulas de *Oryza sativa* sembradas en suelos contaminados con cadmio.

El uso de suelo rizosférico con esporas de hongos micorrízicos arbuscular (HMA) empleado en el estudio tuvo diferencias significativas entre los tratamientos; pues la mayor producción de esporas logradas en el tratamiento con aplicación de HMA sin la presencia de cadmio (T2) en suelos inoculados con este metal comparado con el tratamiento combinado de HMA y cadmio (T4), mostraron a la efectividad de los HMA y al arroz; muchos reportes indican que las gramíneas como el arroz tienen la particularidad de actuar como cultivo hospedero favoreciendo la multiplicación de HMA. Como lo demuestra Chaiyasen et al. (2016), donde obtuvieron valores cercanos a lo nuestro que fluctuaron entre 1081 y 9050 esporas en 100 g de suelo empleando *Z. mays*, *S. bicolor* y *Mimosa invisa* como cultivos hospederos en diferentes sustratos bajo condiciones de vivero por un tiempo de 90 días y 7 días puestas a estrés hídrico. Otro reporte con resultados muy cercanos a este estudio lo reportó Alva (2019), quien obtuvo 1261 esporas de micorrizas en cultivo hospedero de *O. sativa* en 100 g de suelo colectado de los sustratos.

Las diferencias de las esporas logradas en este estudio se deben básicamente a tres factores; siendo uno de ellos el cultivo hospedero empleado como gramínea (arroz). Este cultivo hospedero es considerado por su habilidad de hacer simbiosis con los hongos micorrízicos arbusculares (Muñoz 2000). Un segundo factor probablemente se

deba a las propiedades fisicoquímicos del suelo que fueron los ideales para que los HMA se desarrollen y formen simbiosis con las raíces del arroz y un tercer factor está relacionado a la diversidad de especies con habilidades para adaptarse a dicho ambiente. Es muy conocido que las plantas de arroz presentan abundante masa radicular con características finas como lo son las raíces secundarias y terciarias. Por lo tanto, la propagación de esporas se vieron promovidos por estos tres factores; siendo el cultivo hospedero lo más importante (Selvakumar, et al. 2016).

Mientras tanto que el tratamiento T4 con aplicación de cadmio (Cd) y HMA mostraron disminución de esporas. Muchos reportes indican que un suelo contaminado con Cd presenta menor presencia de morfoespecies de HMA. Otros estudios encontraron que en suelos con niveles por encima de $2 \text{ mg kg}^{-1} \text{ Cd}$, contienen baja esporulación de HMA, alta y diversidad de micorrizas arbusculares (Del Val, et al. 1999; Hassan, et al. 2011). El Cd, en sustratos bajo condiciones controladas, tiene la habilidad de inhibir la propagación de esporas, restringir el crecimiento y extensión del micelio (Weissenhorn et al., 1993), por lo tanto este elemento es perjudicial en la estabilidad de estos microorganismos; haciéndolos más sensibles a muchas especies y adaptar a la vez algunas con facilidad de adaptación (Schneider, et al. 2016).

Muchas especies de micorrizas arbusculares tienen capacidad para adaptarse a diferentes condiciones ambientales incluso adversas y extremos (Weissenhorn, et al. 1993). Los suelos contaminados con cadmio presentan estrés frecuente con capacidad autónoma de seleccionar las especies por su adaptabilidad y su potencial de funcionalidad en los diferentes ecosistemas asociados a los vegetales (Millar y Bennett 2016). Los HMA asociados y adaptados a suelos con cadmio se debe a la segregación de glomalina por las hifas siendo este un mecanismo de adaptación y tolerancia a elementos pesados (Leal, et al. 2016).

5.2.2. Colonización micorrízica en plántulas de *Oryza sativa* sembradas en suelos contaminados con cadmio.

El estudio de HMA en plantas de arroz a nivel de vivero en este estudio se debe probablemente a la potencialidad de las especies para colonizar las raíces secundarias y terciarias en dicho cultivo hospedero, estos resultados están respaldados por otros estudios; tal es el caso de Habiyaremye et al. (2018), quienes hacen énfasis en la inoculación y propagación de las esporas de HMA y la importancia del sistema radicular en las gramíneas como el arroz y maíz por su corto periodo vegetativo; formando simbiosis entre ambos componentes; al mismo tiempo plantas de arroz con HMA mostraron una colonización que fluctuó entre 10 % a 100 % y con una colonización media de 40 %. Esto es corroborado por también por Chaiyasen, et al. (2016) donde demostraron que cultivares hospederos como *Zea mays* obtuvieron 65 % de colonización de raíces establecidas en sustrato de vermiculita; sin embargo, Alva, (2019) indicaron mayores porcentajes en sistema radicular de *Oryza sativa* con promedio de 24.49 %.

La facilidad de la simbiosis realizada entre la planta de arroz y los HMA es debido que este cereal es un vegetal es de crecimiento rápido con abundante masa radicular (Bustamante y Zambrano 2017), considerada como un vegetal monocotiledóneo (Sharma, et al. 2017). Pues se indica que la colonización de raíces por micorrizas presenta vínculos estrechos con propiedades fisiológicas de la planta (Arévalo Hernández 2016). En este estudio se puede notar la reducción de la colonización de raíces de arroz por HMA en suelos inoculados con cadmio resultados muy cercanos a lo obtenido por Miransari (2017).

5.3. Contenido de clorofila en plántulas de *Oryza sativa* sembradas en suelos contaminados con cadmio.

El contenido de clorofila fue mayor cuando se aplicaron HMA a sustratos sin aplicación de cadmio en plantas de arroz; sin embargo, con la combinación con aplicación cadmio el nivel de clorofila disminuyó. La clorofila presenta indicadores esenciales sobre el estado nutricional de las hojas (Mohamed, et al. 2017). Existe correlación favorable de la clorofila y el nitrógeno en el área foliar de diferentes cultivares (Wang, et al.

2014). Razón por la cual la clorofila media la deficiencia de N en la agricultura (Cerovic, *et al.* 2012). Este resultado puede deberse a que los hongos micorrízicos arbusculares promueven la adquisición de nutrientes de la planta huésped y aumentan la síntesis de clorofila y hormonas endógenas (Garcés-Ruíz, *et al.* 2017).). El aumento de la toxicidad de los metales condujo además a una disminución del contenido de clorofila del arroz, lo que resultó directamente en una disminución del 22,7 % en la biomasa aérea, del 21,7 % en la biomasa subterránea y del 11,3 % en la biomasa de granos (Zhou, *et al.* 2022).

VI. CONCLUSIONES

1. Los HMA favorecieron la reducción de cadmio en las raíces y hojas; al mismo tiempo que se mostró mayor acumulación de cadmio en raíces que en las hojas; por lo tanto, en suelos contaminados con cadmio parcialmente es trasladado a las partes vegetativas en plantas de arroz y esto podría ser un serio problema para la salud del ser vivo.
2. El número de esporas y colonización micorrícica fue mayor cuando se aplicaron HMA a las plantas de cacao, mientras tanto disminuyeron cuando se inocularon cadmio a dichos sustratos. Esto podría poner en riesgo la microfauna de las micorrizas arbusculares presentes en el suelo y por ende el fácil movimiento del cadmio de suelo a la planta de arroz.
3. El contenido de clorofila se vio afectado con aplicación de cadmio y favorecido con inoculación de hongos micorrízicos arbusculares, demostrando un indicador para la fertilización foliar o deficiencias nutricionales básicamente de nitrógeno en cultivares de arroz.
4. La clorofila es un indicador directo de la presencia de cadmio en plantas de arroz, pues los pigmentos clorofilianos son más notorias cuando existe cadmio en el suelo y partes vegetativas del arroz.

VII. RECOMENDACIONES

1. Profundizar las investigaciones sobre la correlación de especies de HMA con los niveles de Cd en el suelo de cultivares de arroz.
2. Realizar estudios sobre la absorción de cadmio en diferentes cultivares de arroz de la región San Martín; debido a los diferentes cultivares que se siembran en la región.
3. Ampliar el estudio en parcelas de arroz bajo condiciones climáticamente adversas como son las parcelas de producción en diferentes zonas de la región San Martín.
4. Profundizar estudios sobre el movimiento del cadmio en plantaciones de arroz y suelos con diferentes niveles de cadmio y su potencial de absorción impuesto por las especies de micorrizas arbusculares.
5. Repotenciar la producción de hongos micorrícicos arbusculares en la región San Martín; cuya finalidad sea fortalecer la biofertilización y biorremediación de cadmio en suelos con sembríos de arroz.

REFERENCIAS

ALVA PÉREZ, Fátima, 2019. *Producción masiva de hongos micorrízicos arbusculares utilizando plantas trampa e inóculo de suelo rizosférico de café proveniente de diferentes altitudes de San Martín. Dios* [en línea]. Tesis de grado. Universidad Nacional de San Martín. Disponible en: <https://repositorio.unsm.edu.pe/bitstream/handle/11458/3587/AGRONOMIA%20-%20Jessica%20de%20Fatima%20Alva%20P%C3%A9rez.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

ARÉVALO HERNÁNDEZ, César Oswaldo, 2016. *Prospección de la densidad de esporas y colonización de micorrizas en cacao silvestre de Ucayali Madre de Dios* [en línea]. Tesis de grado. Universidad Nacional Agraria La Molina. Facultad de Agronomía. Disponible en: <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/UNALM/1968>.

BLAUDEZ, D., JACOB, C., TURNAU, K., et al. 2000. Differential responses of ectomycorrhizal fungi to heavy metals in vitro. *Mycol Res*, vol. 104, nº. 11, pp. 1366-1371. <https://doi.org/10.1017/S0953756200003166>

BUSTAMANTE, Anselmo y ZAMBRANO, Wilma, 2017. *Eficiencia de la multiplicación de hongos micorrízicos arbusculares (HMA), nativos en Zea mays L. en condiciones de invernadero, mayo -diciembre, 2014.* [en línea]. Tesis de grado. Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo, Lambayeque, Perú. Disponible en: <https://repositorio.unprg.edu.pe/handle/20.500.12893/798>

BOLAN, N., MAHIMAIRAJA, S., KUNHIKRISHNAN, A., NAIDU, R. 2013. Sorption-bioavailability nexus of arsenic and cadmium in variable-charge soils. *Journal of Hazardous Materials*, vol. 261, pp. 725-732. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.09.074>

BAENA, G. 2017. Metodología de la investigación. 3ra. edición. Grupo Editorial Patria. México. ISBN ebook: 978-607-744-748-1 (Archivo PDF). http://www.biblioteca.cij.gob.mx/Archivos/Materiales_de_consulta/Drogas_de_Abuso/Articulos/metodologia%20de%20la%20investigacion.pdf

BRUNDRETT, M.C., PICHE, Y. y PETERSON, R.L. 1984. A new method for observing the morphology of vesicular-arbuscular mycorrhizae. *Can. J. Bot.* 62: 2128-2134.

CHAIYASEN, A. et al., 2016. Influence of host plants and soil diluents on arbuscular mycorrhizal fungus propagation for on-farm inoculum production using leaf litter compost and agrowastes. *Biological Agriculture y Horticulture*, 33(1), 52–62. doi:10.1080/01448765.2016.1187670

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

CHAVEZ, E. et al., 2015. Concentration of cadmium in cacao beans and its relationship with soil cadmium in southern Ecuador. *Science of the Total Environment*, 533, 205–214.

CUI, L. et al., 2011. "Biochar amendment greatly reduces rice Cd uptake in a contaminated paddy soil: A two-year field experiment," *BioRes.* 6(3), 2605-2618. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/277029911_Biochar_amendment_greatly_reduces_rice_CD_uptake_in_a_contaminated_paddy_soil_A_two-year_field_experiment

CAMPOS, C. N. 1990. La contaminación por metales pesados en la Ciénaga Grande de Santa Marta, Caribe colombiano. *Caldasia. Revista Unal*, 231-243. Obtenido de <https://revistas.unal.edu.co/index.php/cal/article/view/35544>

CHAIYASEN, A. et al., 2016. Influence of host plants and soil diluents on arbuscular mycorrhizal fungus propagation for on-farm inoculum production using leaf litter compost and agrowastes. *Biological Agriculture y Horticulture*, 33(1), 52–62. doi:10.1080/01448765.2016.1187670

CHAVEZ ZEINER, Willkins, 2019. Manejo orgánico de *Oriza sativa* L. en Limoncarro, Pacasmayo, La Libertad. Universidad nacional de Trujillo. Campos <https://dspace.unitru.edu.pe/handle/UNITRU/13449>

CHEN, H.P. et al., 2018. Effective methods to reduce cadmium accumulation in rice grain. *Chemosphere* 207, 699–707.

CHEN Y. X. et al., 2003. Physiological mechanism of plant roots exposed to cadmium. *Chemosphere* 50:789–793

CEROVIC, Zoran, et al. 2012. A new optical leaf-clip meter for simultaneous non-destructive assessment of leaf chlorophyll and epidermal flavonoids. *Physiologia Plantarum*. 2012;146(3):251–260. doi: 10.1111/j.1399-3054.2012.01639.x.

DEL ÁGUILA, Karen, et al., 2018. Inoculación de Consorcios Micorrícicos Arbusculares en *Coffea arabica*, Variedad Caturra en la Región San Martín. *Información tecnológica*, 29(1), 137-146. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642018000100137>

DING, C.F. et al., 2013. Prediction model for cadmium transfer from soil to carrot (*Daucus carota* L.) and its application to derive soil thresholds for food safety. *J. Agr. Food Chem.* 61, 10273–10282.

DEL VAL C, BAREA J.M, AZCÓN-AGUILAR C. 1999. Diversity of arbuscular mycorrhizal fungus populations in heavy-metal-contaminated soils. *Appl Environ Microbiol.* 65(2):718-23. doi: 10.1128/AEM.65.2.718-723.1999.

DANG, Q.H., VU, D.T y PHAM, H.N. 2018. Propagating arbuscular mycorrhizal fungi associated with coffee plant by using the herbaceous host. *Journal of Science Ho Chi Minh City Open University*, 8(1), 58-63. Recuperado de <http://journalofscience.ou.edu.vn/index.php/tech-en/article/view/338/267>

Garcés-Ruíz, Mónica, et al., 2017. Dinámica de la absorción de fósforo a corto plazo por plantas de maíz micorrizas y no micorrizas intactas cultivadas en un sistema de cultivo semihidropónico circulatorio. *Parte delantera. ciencia de las plantas*, 8 (2017), págs. 1471 – 1478. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01471>

HABIYAREMYE, Jean, et al., 2018. Indigenous arbuscular mycorrhizal fungi associated with tree species of the agroforestry systems of Rwanda and their potential to colonize maize roots. *African Journal of Microbiology Research*, 12 (36), 879-888. doi.org/10.5897/AJMR2017.8511

HU, Yanling. et al., 2009. Cadmium toxicity and translocation in rice seedlings are reduced by hydrogen peroxide pretreatment. *Plant Growth Regul.* 59 (1), 51-61. Doi. [10.1007/s10725-009-9387-7](https://doi.org/10.1007/s10725-009-9387-7)

JANEESHMA, E. y PUTHUR, J.T. 2020. Direct and indirect influence of arbuscular mycorrhizae on enhancing metal tolerance of plants. *Arch Microbiol* 202, 1–16 <https://doi.org/10.1007/s00203-019-01730-z>

JANOUSHKOVÁ, M. y D. PAVLÍKOVÁ. 2010. Cadmium immobilization in the rhizosphere of arbuscular mycorrhizal plants by the fungal extraradical mycelium. *Plant Soil* 332, 511–520. <https://doi.org/10.1007/s11104-010-0317-2>

KANU, Adam Sheka, et al., 2017. Cadmium Uptake and Distribution in Fragrant Rice Genotypes and Related Consequences on Yield and Grain Quality Traits. *Journal of Chemistry*. 1–9. <https://doi.org/10.1155/2017/1405878>

LEAL, P.L, et al. 2016. Enrichment of arbuscular mycorrhizal fungi in a contaminated soil after rehabilitation. *Brazilian J Microbiol.* 47(4):853-862. Doi: <http://doi.org/10.1016/j.bjm.2016.06.001>

LI, H. 2017. Cadmium in rice: Transport mechanisms, influencing factors, and minimizing measures. *Environ Pollut.* 224:622-630. doi: 10.1016/j.envpol.2017.01.087.

MEHARG, A.A., 2013. Variation in Rice Cadmium Related to Human Exposure. *Environ. Sci. Technol.* 47 (11), 5613–5618. Doi: 10.1021/es400521h

Ministerio del Ambiente [MINAM] (2014). Guía para el muestreo de suelos. Recuperado de <https://www.minam.gob.pe/calidadambiental/wp-content/uploads/sites/22/2013/10/GUIA-PARA-EL-MUESTREO-DE-SUELOS-final.pdf>

MIRANSARI, M. 2017. Arbuscular mycorrhizal fungi and heavy metal tolerance in plants. In: Wu QS. (eds.). *Arbuscular Mycorrhizas and Stress Tolerance of Plants*. Springer, Singapore. 147-161. Doi: [10.1007/978-981-10-5514-0_4](https://doi.org/10.1007/978-981-10-5514-0_4)

MENG, J. et al., 2021. Combined effects of arbuscular mycorrhizae fungus and composted pig manure on the growth of ryegrass and uptake of Cd and Zn in the soil from an e-waste recycling site. *Environ Sci Pollut Res* **28**, 12677–12685 (2021). <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11215-y>

MILLAR, Niall y BENNETT, Alison, 2016. Stressed out symbiotes: hypotheses for the influence of abiotic stress on arbuscular mycorrhizal fungi. *Oecologia*. 2016;182(3):625-641. <http://doi.org/10.1007/s00442-016-3673-7>

MARCANO., T. H. (2011). La Contaminación con Cadmio en Suelos Agrícolas. La Contaminación con Cadmio en Suelos Agrícolas. Universidad Central de Venezuela, Maracay. Obtenido de:

http://190.169.94.12/ojs/index.php/rev_venes/article/view/1112/1040

MOHAMED, Ali et al., 2017. Leaf nitrogen determination using non-destructive techniques a review. *Journal of Plant Nutrition*, vol. 40, nº. 7, pp. 928-953. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/01904167.2016.1143954>

Ministerio de Agricultura y Riego. (2017). Boletín, Informe del Arroz. Dirección General de Políticas Agrarias. <http://minagri.gob.pe/portal/boletinde-arroz/arroz-2017>. Boletín – Informe del arroz. Dirección General de Políticas Agrarias. Dirección de estudios económicos e información agraria. Lima. Informe del Arroz. Lima.

MUÑOZ, M.C. (2000). *Diversidad de hongos formadores de micorrizas arbusculares en suelos contaminados con metales pesado*. [en línea]. Tesis doctoral. Universidad de Granada, España. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=141082>

SINHA, S. et al., 2013. Comparative evaluation of metal phytoremediation potential of trees, grasses, and flowering plants from Tannery-wastewater-contaminated soil in relation with physicochemical properties. *Journal Soil. Contamination*. 22, 958–983. <https://doi.org/10.1080/15320383.2013.770437>.

SONG, Y. et al. 2017. Dietary cadmium exposure assessment among the Chinese population. *PLoS ONE* 12(5): e0177978. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0177978>

PAWLOWSKA, T.E. y CHARVAT, I. 2004. Heavy-metal stress and developmental patterns of arbuscular mycorrhizal fungi. *Appl Environ Microbiol*. 70(11):6643-9. doi: 10.1128/AEM.70.11.6643-6649.2004.

RASK, K. A. 2019. Differences in arbuscular mycorrhizal colonisation influence cadmium uptake in plants. *Environmental and Experimental Botany*, 162, 223-229. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2019.02.022>

SCHNEIDER Jerusa, et al., 2016. Arbuscular mycorrhizal fungi-assisted phytoremediation of a lead-contaminated site. *Sci Total Environ.* 572, 86-97. Doi: <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.07.185>

SCHREIBER, L. y FRANKE, R.B. (2001). Endodermis and Exodermis in Roots. In: ELS. John Wiley and Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1038/npg.els.0002086>

SHAH, F., KHAN, Z. y AMJAD, I. (2018). Rice Crop - Current Developments Improving Rice Grain Quality by Enhancing Accumulation of Iron and Zinc While Minimizing Cadmium and Lead. 10.5772/intechopen.69831. doi:10.5772/intechopen.72826

SONG, W. et al., 2015. Variation of Cd concentration in various rice cultivars and derivation of cadmium toxicity thresholds for paddy soil by species-sensitivity distribution. *J. Integr. Agric.* 14, 1845–1854.

SONG, Y. et al., 2017. Dietary cadmium exposure assessment among the Chinese population. *PLoS One* 12, e0177978

SHARMA, S., Sharma, S., Aggarwal, A., Sharma, V., Singh, M. J., y Kaushik, S. (2017). Multiplication of Arbuscular Mycorrhizal Fungi. *Mycorrhizal Fungi*, pp. 154-168.

SELVAKUMAR, G. et al., 2016. Trap culture technique for propagation of arbuscular mycorrhizal fungi using different host plants. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, 49(5), pp. 608- 613. doi.org/10.7745/KJSSF.2016.49.5.608

TORRES, N.; ANTOLÍN, M. C. y GOICOECHEA, N. 2018. Arbuscular mycorrhizal symbiosis as a promising resource for improving berry quality in grapevines under changing environments. *Frontiers in Plant Science*, 9, 897. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00897>

UMED, Ali, et al., 2020. The Influence of pH on Cadmium Accumulation in Seedlings of Rice (*Oryza sativa* L.). *J Plant Growth Regul* 39, 930–940 (2020). <https://doi.org/10.1007/s00344-019-10034-x>

URAGUCHI, S. et al., 2009. Root-to-shoot Cd translocation via the xylem is the major process determining shoot and grain cadmium accumulation in rice,” *Journal of Experimental Botany*, vol. 60, no. 9, pp. 2677–2688

VALLEJOS-TORRES, Geomar, et al., 2022. High genetic diversity in arbuscular mycorrhizal fungi influence cadmium uptake and growth of cocoa plants. *Bioagro*, 34(1), 75-84. <https://doi.org/10.51372/bioagro341.7>

VALLEJOS-TORRES, Geomar, 2021. The Role of Arbuscular Mycorrhizal Fungi Against Root-Knot Nematode Infections in Coffee Plants. *J Soil Sci Plant Nutr* 21, 364–373 (2021). <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00366-z>

VALLEJOS-TORRES, Geomar, et al., 2019. Efecto de hongos formadores de micorrizas arbusculares en clones de café (*Coffea arabica*) variedad Caturra. *Acta Agronómica* 68(4): 278-284.

WANG, et al., 2014. Estimating rice chlorophyll content and leaf nitrogen concentration with a digital still color camera under natural light. *Plant Methods*. 10(1):36. doi: 10.1186/1746-4811-10-36.

WANG, Y., BAO, X, LI S. 2021. Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on Rice Growth Under Different Flooding and Shading Regimes. *Front Microbiol.* 26, 756752. doi: 10.3389/fmicb.2021.756752.

WIPF, D. et al., 2019. Trading on the arbuscular mycorrhiza market: from arbuscules to common mycorrhizal Networks. *New Phytologist* 223, 1127–1142. <https://dx.doi.org/10.1111/nph.15775>.

WEISSENHORN, I., LEYVAL, C., BERTHELIN J. 1993. Cd-tolerant arbuscular mycorrhizal (AM) fungi from heavy-metal polluted soils. *Plant Soil.* 157(2):247-256. Doi: <http://doi.org/10.1007/BF00011053>

YASIR, H. et al., 2019. An explanation of soil amendments to reduce cadmium phytoavailability and transfer to food chain. *Sci. Total. Environment.* 660, 80–96. <https://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.419>.

ZHOU, Min, et al., 2022. Effects of Antimony on Rice Growth and Its Existing Forms in Rice Under Arbuscular Mycorrhizal Fungi Environment. *Frontiers in Microbiology*, 13, <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fmicb.2022.814323>

ZHUO, Feng, et al., 2020. The effect of arbuscular mycorrhizal fungi and biochar on the growth and Cd/Pb accumulation in *Zea mays*. *International Journal of Phytoremediation.* 22. 1-10. 10.1080/15226514.2020.1725867.

ZIA-UR-REHMAN, Muhammad, et al., 2021. Effect of biochar and compost on cadmium bioavailability and its uptake by wheat-rice cropping system irrigated with untreated sewage water: A field study. *Arabian Journal of Geosciences.* 14. 10.1007/s12517-020-06383-7.

ZIHAO Yu, et al., 2021. Effect of an arbuscular mycorrhizal fungus on maize growth and cadmium migration in a sand column, *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 225. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112782>.

ZENG, X. et al., 2017. Characterization of strain *Cupriavidus* sp. zsk and its biosorption of heavy metal ions. *Journal Biobased Mater. Bio.* 11, 154–158. <https://dx.doi.org/10.1166/jbmb.2017.1649>.

ANEXOS

Anexo 1

Identificación de Variables

Evaluar los niveles del cadmio en plántulas de “arroz” <i>Oryza sativa</i> sembradas en suelos contaminados con cadmio en la Región San Martín San Martín			
Variable abstracta	Indicadores	Definición operacional	Unidad de medida
Cadmio	Raíces de plantas de arroz	Método de EPA 3050B.	mg kg ⁻¹
	Hojas de plantas de arroz	Digestión: HNO ₃ /espectr. Absorción Atómica	mg kg ⁻¹
Evaluar los efectos del cadmio en el conteo y colonización micorrízica en plántulas de “arroz” <i>Oryza sativa</i> en la Región San Martín			
Variable abstracta	Indicadores	Definición operacional	Unidad de medida
Suelo rizosférico de arroz	Colonización micorrízica	Metodología desarrollada por Brundrett et al. (1984).	Ordinal
	Conteo de esporas	Metodología desarrollada por Brundrett et al. (1984).	%
Determinar los efectos del cadmio y colonización micorrízica en la clorofila de plántulas de “arroz” <i>Oryza sativa</i> en la Región San Martín.			
Variable abstracta	Indicadores	Definición operacional	Unidad de medida
Hojas	Contenido de clorofila en hojas	Minolta SPAD-502	MJ m ⁻²

Fuente: Elaboración Propia (2022)

Anexo 2

Datos de los análisis de cadmio en muestras de arroz

Tratamientos	Rep.	Inóculo de HMA	Cadmio (ppm)	Cadmio en Raíz (ppm)	Cadmio en brot (ppm)
T1	P1	Sin HMA	0	0,98	0,3
	P2			0,9	0,2
	P3			0,98	0,25
T2	P1	Con HMA	0	0,71	0,38
	P2			0,71	0,38
	P3			0,71	0,38
T3	P1	Sin HMA	5	10,66	1,94
	P2			10,69	1,73
	P3			10,68	1,84
T4	P1	Con HMA	5	7,35	1,73
	P2			9,3	1,56
	P3			7,29	1,65

Anexo 3

Datos de los análisis de micorrización y clorofila en muestras de arroz

Tratamientos	Inóculo de HMA	Cadmio (ppm)	Conteo de esporas de HMA	Colonización micorrízico (%)	Clorofila
T1	Sin HMA	0	0	0	27,9
			0	0	26,4
			0	0	27,5
T2	Con HMA	0	820	66,11	32,1
			780	67,22	30,7
			720	64,44	34,1
T3	Sin HMA	5	0	0	25,5
			0	0	25,7
			0	0	26,1
T4	Con HMA	5	280	28,33	28,9
			120	26,67	32,1
			225	22,78	26,9

INFORME DE OPINIÓN SOBRE INSTRUMENTOS DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA

I. DATOS GENERALES

Apellido y nombre del experto : Ordóñez Sánchez, Luis Alberto
 Institución donde labora : UCV Docente DTC investigador
 Especialidad : Producción vegetal y ecosistemas agroforestales
 Instrumento de evaluación : Cadena de custodia
 Autor(s) del instrumento (s) : López Espinoza, Herman
 Tuanama Montenegro, Stalin Yoel

II. ASPECTOS DE VALIDACION

MUY DEFICIENTE (1) DEFICIENTE (2) ACEPTABLE (3) BUENA (4) EXCELENTE (5)

CRITERIOS	INDICADORES	1	2	3	4	5
CLARIDAD	Los ítems están redactados con lenguaje apropiado y libre de ambigüedades acorde con los sujetos muestrales.					x
ACTUALIDAD	instrumento demuestra vigencia acorde con el conocimiento científico, tecnológico, innovación ilegal inherente a la variable: contenido de cadmio					x
ORGANIZACIÓN	los ítems del instrumento reflejan organicidad lógica entre la definición operacional y conceptual respeto a la variable, de manera que permitan hacer inferencia en la función de la hipótesis, problema y objetivos e la investigación.					x
SUFICIENTE	los ítems del instrumento son suficientes en cantidad y calidad acorde a la variable, dimensiones e indicadores.					x
INTENCIONALIDAD	los ítems del instrumento son coherentes con el tipo de investigación y responden a los objetivos hipótesis y variable de estudio contenido de cadmio					x
CONSISTENCIA	la información que se recoja a través de los ítems del instrumento permitirá analizar describir y explicar la realidad, motivo de la investigación.					x
COHERENCIA	los ítems del instrumento expresa la relación con los indicadores de cada dimensión de la variable contenido de cadmio				x	
METODOLOGIA	la relación entre la técnica y el instrumento propuesto, responde al propósito de la investigación, desarrollo tecnológico e innovación.					x
PERTINECIA	la redacción de los ítems concuerda con la escala valorativa del instrumento.				x	
PUNTAJE TOTAL		43				

(nota: tener en cuenta que el instrumento es válido cuando se tiene un puntaje mínimo de 41 Excelente”, sin embargo, un puntaje menos a anterior se considera al instrumento no valido ni aplicable)

III. OPINION DE APLICABILIDAD

El instrumento es valido
Promedio de valoración

Tarapoto 20 de julio del 2022



INFORME DE OPINIÓN SOBRE INSTRUMENTOS DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA

I. DATOS GENERALES

Apellido y nombre del experto : Ordóñez Sánchez, Luis Alberto
 Institución donde labora : UCV Docente DTC investigador
 Especialidad : Producción vegetal y ecosistemas agroforestales
 Instrumento de evaluación : Cadena de custodia
 Autor(s) del instrumento (s) : López Espinoza, Herman
 Tuanama Montenegro, Stalin Yoel

II. ASPECTOS DE VALIDACION

MUY DEFICIENTE (1) DEFICIENTE (2) ACEPTABLE (3) BUENA (4) EXCELENTE (5)

CRITERIOS	INDICADORES	1	2	3	4	5
CLARIDAD	Los ítems están redactados con lenguaje apropiado y libre de ambigüedades acorde con los sujetos muestrales.					x
ACTUALIDAD	instrumento demuestra vigencia acorde con el conocimiento científico, tecnológico, innovación ilegal inherente a la variable: concentración de micorrizas					x
ORGANIZACIÓN	los ítems del instrumento reflejan organicidad lógica entre la definición operacional y conceptual respeto a la variable, de manera que permitan hacer inferencia en la función de la hipótesis, problema y objetivos e la investigación.					x
SUFICIENTE	los ítems del instrumento son suficientes en cantidad y calidad acorde a la variable, dimensiones e indicadores.					x
INTENCIONALIDAD	los ítems del instrumento son coherentes con el tipo de investigación y responden a los objetivos hipótesis y variable de estudio concentración de micorrizas					x
CONSISTENCIA	la información que se recoja a través de los ítems del instrumento permitirá analizar describir y explicar la realidad, motivo de la investigación.					x
COHERENCIA	los ítems del instrumento expresa la relación con los indicadores de cada dimensión de la variable concentración de micorrizas				x	
METODOLOGIA	la relación entre la técnica y el instrumento propuesto, responde al propósito de la investigación, desarrollo tecnológico e innovación.					x
PERTINECIA	la redacción de los ítems concuerda con la escala valorativa del instrumento.				x	
PUNTAJE TOTAL		43				

(nota: tener en cuenta que el instrumento es válido cuando se tiene un puntaje mínimo de 41 Excelente”, sin embargo, un puntaje menos a anterior se considera al instrumento no valido ni aplicable)

III. OPINION DE APLICABILIDAD

El instrumento es valido
Promedio de valoración

Tarapoto 20 de julio del 2022



INFORME DE OPINIÓN SOBRE INSTRUMENTOS DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA

I. DATOS GENERALES

Apellido y nombre del experto : Andi Lozano Chung
 Institución donde labora : Universidad Nacional de San Martín
 Especialidad : Ing. Ambiental
 Instrumento de evaluación : Cadena de custodia
 Autor(s) del instrumento (s) : López Espinoza, Herman
 Tuanama Montenegro, Stalin Yoel

II. ASPECTOS DE VALIDACION

MUY DEFICIENTE (1) DEFICIENTE (2) ACEPTABLE (3) BUENA (4) EXCELENTE (5)

CRITERIOS	INDICADORES	1	2	3	4	5
CLARIDAD	Los ítems están redactados con lenguaje apropiado y libre de ambigüedades acorde con los sujetos muestrales.					x
ACTUALIDAD	instrumento demuestra vigencia acorde con el conocimiento científico, tecnológico, innovación ilegal inherente a la variable: concentración de micorrizas					x
ORGANIZACIÓN	los ítems del instrumento reflejan organicidad lógica entre la definición operacional y conceptual respeto a la variable, de manera que permitan hacer inferencia en la función de la hipótesis, problema y objetivos e la investigación.					x
SUFICIENTE	los ítems del instrumento son suficientes en cantidad y calidad acorde a la variable, dimensiones e indicadores.					x
INTENCIONALIDAD	los ítems del instrumento son coherentes con el tipo de investigación y responden a los objetivos hipótesis y variable de estudio concentración de micorrizas					x
CONSISTENCIA	la información que se recoja a través de los ítems del instrumento permitirá analizar describir y explicar la realidad, motivo de la investigación.					x
COHERENCIA	los ítems del instrumento expresa la relación con los indicadores de cada dimensión de la variable concentración de micorrizas				x	
METODOLOGIA	la relación entre la técnica y el instrumento propuesto, responde al propósito de la investigación, desarrollo tecnológico e innovación.					x
PERTINECIA	la redacción de los ítems concuerda con la escala valorativa del instrumento.				x	
PUNTAJE TOTAL		43				

(nota: tener en cuenta que el instrumento es válido cuando se tiene un puntaje mínimo de 41 Excelente”, sin embargo, un puntaje menos a anterior se considera al instrumento no valido ni aplicable)

III. OPINION DE APLICABILIDAD

El instrumento es valido
Promedio de valoración

Tarapoto 20 de julio del 2022



INFORME DE OPINIÓN SOBRE INSTRUMENTOS DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA

I. DATOS GENERALES

Apellido y nombre del experto : Andi Lozano Chung
 Institución donde labora : Universidad Nacional de San Martín
 Especialidad : Ing. Ambiental
 Instrumento de evaluación : Cadena de custodia
 Autor(s) del instrumento (s) : López Espinoza, Herman
 Tuanama Montenegro, Stalin Yoel

II. ASPECTOS DE VALIDACION

MUY DEFICIENTE (1) DEFICIENTE (2) ACEPTABLE (3) BUENA (4) EXCELENTE (5)

CRITERIOS	INDICADORES	1	2	3	4	5
CLARIDAD	Los ítems están redactados con lenguaje apropiado y libre de ambigüedades acorde con los sujetos muestrales.					x
ACTUALIDAD	instrumento demuestra vigencia acorde con el conocimiento científico, tecnológico, innovación ilegal inherente a la variable: contenido de cadmio					x
ORGANIZACIÓN	los ítems del instrumento reflejan organicidad lógica entre la definición operacional y conceptual respeto a la variable, de manera que permitan hacer inferencia en la función de la hipótesis, problema y objetivos e la investigación.					x
SUFICIENTE	los ítems del instrumento son suficientes en cantidad y calidad acorde a la variable, dimensiones e indicadores.					x
INTENCIONALIDAD	los ítems del instrumento son coherentes con el tipo de investigación y responden a los objetivos hipótesis y variable de estudio contenido de cadmio					x
CONSISTENCIA	la información que se recoja a través de los ítems del instrumento permitirá analizar describir y explicar la realidad, motivo de la investigación.					x
COHERENCIA	los ítems del instrumento expresa la relación con los indicadores de cada dimensión de la variable contenido de cadmio				x	
METODOLOGIA	la relación entre la técnica y el instrumento propuesto, responde al propósito de la investigación, desarrollo tecnológico e innovación.					x
PERTINECIA	la redacción de los ítems concuerda con la escala valorativa del instrumento.				x	
PUNTAJE TOTAL		43				

(nota: tener en cuenta que el instrumento es válido cuando se tiene un puntaje mínimo de 41 Excelente”, sin embargo, un puntaje menos a anterior se considera al instrumento no valido ni aplicable)

III. OPINION DE APLICABILIDAD

El instrumento es valido
Promedio de valoración

Tarapoto 20 de julio del 2022



INFORME DE OPINIÓN SOBRE INSTRUMENTOS DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA

I. DATOS GENERALES

Apellido y nombre del experto : Dra. Karla Luz Mendoza López
 Institución donde labora : UCV
 Especialidad : EIA
 Instrumento de evaluación : Cadena de custodia
 Autor(s) del instrumento (s) : López Espinoza, Herman
 Tuanama Montenegro, Stalin Yoel

II. ASPECTOS DE VALIDACION

MUY DEFICIENTE (1) DEFICIENTE (2) ACEPTABLE (3) BUENA (4) EXCELENTE (5)

CRITERIOS	INDICADORES	1	2	3	4	5
CLARIDAD	Los ítems están redactados con lenguaje apropiado y libre de ambigüedades acorde con los sujetos muestrales.				X	
ACTUALIDAD	instrumento demuestra vigencia acorde con el conocimiento científico, tecnológico, innovación ilegal inherente a la variable: contenido de cadmio				X	
ORGANIZACIÓN	los ítems del instrumento reflejan organicidad lógica entre la definición operacional y conceptual respeto a la variable, de manera que permitan hacer inferencia en la función de la hipótesis, problema y objetivos e la investigación.					X
SUFICIENTE	los ítems del instrumento son suficientes en cantidad y calidad acorde a la variable, dimensiones e indicadores.					X
INTENCIONALIDAD	los ítems del instrumento son coherentes con el tipo de investigación y responden a los objetivos hipótesis y variable de estudio contenido de cadmio					X
CONSISTENCIA	la información que se recoja a través de los ítems del instrumento permitirá analizar describir y explicar la realidad, motivo de la investigación.				X	
COHERENCIA	los ítems del instrumento expresa la relación con los indicadores de cada dimensión de la variable contenido de cadmio					X
METODOLOGIA	la relación entre la técnica y el instrumento propuesto, responde al propósito de la investigación, desarrollo tecnológico e innovación.					X
PERTINECIA	la redacción de los ítems concuerda con la escala valorativa del instrumento.					X
PUNTAJE TOTAL		42				

(nota: tener en cuenta que el instrumento es válido cuando se tiene un puntaje mínimo de 41 Excelente”, sin embargo, un puntaje menos a anterior se considera al instrumento no valido ni aplicable)

III. OPINION DE APLICABILIDAD

El instrumento es valido

Promedio de valoración 42

Tarapoto 20 de julio del 2022



INFORME DE OPINIÓN SOBRE INSTRUMENTOS DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA

I. DATOS GENERALES

Apellido y nombre del experto : Dra. Karla Luz Mendoza López
 Institución donde labora : UCV
 Especialidad : EIA
 Instrumento de evaluación : Cadena de custodia
 Autor(s) del instrumento (s) : López Espinoza, Herman
 Tuanama Montenegro, Stalin Yoel

II. ASPECTOS DE VALIDACION

MUY DEFICIENTE (1) DEFICIENTE (2) ACEPTABLE (3) BUENA (4) EXCELENTE (5)

CRITERIOS	INDICADORES	1	2	3	4	5
CLARIDAD	Los ítems están redactados con lenguaje apropiado y libre de ambigüedades acorde con los sujetos muestrales.				X	
ACTUALIDAD	instrumento demuestra vigencia acorde con el conocimiento científico, tecnológico, innovación ilegal inherente a la variable: concentración de micorrizas					x
ORGANIZACIÓN	los ítems del instrumento reflejan organicidad lógica entre la definición operacional y conceptual respeto a la variable, de manera que permitan hacer inferencia en la función de la hipótesis, problema y objetivos e la investigación.					X
SUFICIENTE	los ítems del instrumento son suficientes en cantidad y calidad acorde a la variable, dimensiones y indicadores.					X
INTENCIONALIDAD	los ítems del instrumento son coherentes con el tipo de investigación y responden a los objetivos hipótesis y variable de estudio concentración de micorrizas				X	
CONSISTENCIA	la información que se recoja a través de los ítems del instrumento permitirá analizar describir y explicar la realidad, motivo de la investigación.					X
COHERENCIA	los ítems del instrumento expresa la relación con los indicadores de cada dimensión de la variable concentración de micorrizas					X
METODOLOGIA	la relación entre la técnica y el instrumento propuesto, responde al propósito de la investigación, desarrollo tecnológico e innovación.					X
PERTINECIA	la redacción de los ítems concuerda con la escala valorativa del instrumento.				X	
PUNTAJE TOTAL		42				

(nota: tener en cuenta que el instrumento es válido cuando se tiene un puntaje mínimo de 41 Excelente”, sin embargo, un puntaje menos a anterior se considera al instrumento no valido ni aplicable)

III. OPINION DE APLICABILIDAD

El instrumento es valido

Promedio de valoración 42

Tarapoto 20 de julio del 2022





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 Completa titulada: "Influencia de suelos contaminados con cadmio en la micorrización y contenido de clorofila en "arroz" Oriza sativa (L.) en San Martín, 2022.", cuyos autores son LOPEZ ESPINOZA HERMAN, TUANAMA MONTENEGRO STALIN YOEL, constato que la investigación cumple con el índice de similitud establecido, y 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 Completa 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 2022

Apellidos y Nombres del Asesor:	Firma
VALLEJOS TORRES GEOMAR DNI: 01162440 ORCID 0000-0001-7084-977X	Firmado digitalmente por: GVALLEJOST el 22-07- 2022 15:45:08

Código documento Trilce: TRI - 0360324