

**UNIVERSIDAD CATÓLICA SEDES SAPIENTIAE**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA AGRARIA**



Biorremediación del cadmio en “arroz” *Oryza sativa* L. por micorrizas arbusculares en condiciones de vivero de la Región San Martín

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE  
INGENIERO AMBIENTAL**

**AUTORES**

María Cleofe Córdova Riva  
Rachel Cristina Ramírez Rufino

**ASESOR**

Geomar Vallejos Torres

Rioja, Perú

2023

**METADATOS COMPLEMENTARIOS****Datos de los Autores****Autor 1**

Nombres	
Apellidos	
Tipo de documento de identidad	
Número del documento de identidad	
Número de Orcid (opcional)	

**Autor 2**

Nombres	
Apellidos	
Tipo de documento de identidad	
Número del documento de identidad	
Número de Orcid (opcional)	

**Autor 3**

Nombres	
Apellidos	
Tipo de documento de identidad	
Número del documento de identidad	
Número de Orcid (opcional)	

**Autor 4**

Nombres	
Apellidos	
Tipo de documento de identidad	
Número del documento de identidad	
Número de Orcid (opcional)	

**Datos de los Asesores****Asesor 1**

Nombres	
Apellidos	
Tipo de documento de identidad	
Número del documento de identidad	
Número de Orcid (Obligatorio)	

**Asesor 2**

Nombres	
Apellidos	
Tipo de documento de identidad	
Número del documento de identidad	
Número de Orcid (Obligatorio)	

### Datos del Jurado

#### Presidente del jurado

Nombres	
Apellidos	
Tipo de documento de identidad	
Número del documento de identidad	

#### Segundo miembro

Nombres	
Apellidos	
Tipo de documento de identidad	
Número del documento de identidad	

#### Tercer miembro

Nombres	
Apellidos	
Tipo de documento de identidad	
Número del documento de identidad	

### Datos de la Obra

Materia*	
Campo del conocimiento OCDE Consultar el listado:	
Idioma	
Tipo de trabajo de investigación	
País de publicación	
Recurso del cual forma parte (opcional)	
Nombre del grado	
Grado académico o título profesional	
Nombre del programa	
Código del programa Consultar el listado:	

**\*Ingresar las palabras clave o términos del lenguaje natural (no controladas por un vocabulario o tesauro).**

## ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

ACTA N° 047 - 2023/UCSS/FIA/DI

Siendo las 03:00 p.m. del martes 21 de noviembre de 2023, a través de la plataforma virtual zoom de la Universidad Católica Sedes Sapientiae, el Jurado de Tesis integrado por:

- |                                 |                 |
|---------------------------------|-----------------|
| 1. Wilfredo Mendoza Caballero   | Presidente      |
| 2. Juan Ignacio Pastén Monárdez | primer miembro  |
| 3. Armando Chiclla Salazar      | segundo miembro |
| 4. Geomar Vallejos Torres       | asesor(a)       |

Se reunieron para la sustentación virtual de la tesis titulada **Biorremediación del cadmio en "arroz" *Oriza sativa* L. por micorrizas arbusculares en condiciones de vivero de la Región San Martín**, que presentan las bachilleres en Ciencias Ambientales **María Cleofé Córdova Riva y Rachel Cristina Ramírez Rufino**, cumpliendo así con los requerimientos exigidos por el reglamento para la modalidad de titulación; la presentación y sustentación de un trabajo de investigación original, para obtener el Título Profesional de **Ingeniero Ambiental**.

Terminada la sustentación y luego de deliberar, el Jurado acuerda:

APROBAR

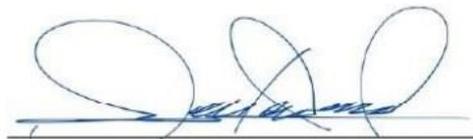
DESAPROBAR

La tesis, con el calificativo de **MUY BUENA** y eleva la presente Acta al Decanato de la Facultad de Ingeniería Agraria, a fin de que se declare **EXPEDITA** para conferirle el **TÍTULO** de **INGENIERO AMBIENTAL**.

Lima, 21 de noviembre de 2023.



Wilfredo Mendoza Caballero  
**Presidente**



Juan Ignacio Pastén Monárdez  
**1° miembro**



Armando Chiclla Salazar  
**2° miembro**



Geomar Vallejos Torres  
**Asesor(a)**

**Anexo 2****CARTA DE CONFORMIDAD DEL ASESOR(A) DE TESIS / INFORME ACADÉMICO/ TRABAJO DE INVESTIGACIÓN/ TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL CON INFORME DE EVALUACIÓN DEL SOFTWARE ANTIPLAGIO**

Ciudad, de Rioja 28 de febrero del 2024

Señor(a),  
Wilfredo Mendoza Caballero  
**Jefe del Departamento de Investigación**  
**Facultad de Ingeniería Agraria - UCSS**

Reciba un cordial saludo.

Sirva el presente para informar que **la tesis**, bajo mi asesoría, con título: **Biorremediación del cadmio en "arroz" *Oryza sativa* L. por micorrizas arbusculares en condiciones de vivero de la Región San Martín**, presentado por la Bachiller Rachel cristina Ramírez Rufino con código de estudiante 2014101870 y DNI 76175543; María Cleofe Córdova Riva con código 2014101818 y DNI 71690021, para optar **el título profesional** de Ingeniera Ambiental ha sido revisado en su totalidad por mi persona y **CONSIDERO** que el mismo se encuentra **APTO** para ser sustentado ante el Jurado Evaluador.

Asimismo, para garantizar la originalidad del documento en mención, se les ha sometido a los mecanismos de control y procedimientos antiplagio previstos en la normativa interna de la Universidad, **cuyo resultado alcanzó un porcentaje de similitud de 18 %**. Por tanto, en mi condición de asesor(a), firmo la presente carta en señal de conformidad y **adjunto el informe de similitud del Sistema Antiplagio Turnitin**, como evidencia de lo informado.

Sin otro particular, me despido de usted. Atentamente,

A handwritten signature in purple ink, appearing to read 'G. Vallejos Torres', is positioned above a horizontal line.

Dr. Geomar Vallejos Torres  
DNI N°01162440  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7084-977X>  
Facultad de Ingeniería Agraria  
UCSS

(\*) De conformidad con el artículo 8°, del Capítulo 3 del Reglamento de Control Antiplagio e Integridad Académica para trabajos para optar grados y títulos, aplicación del software antiplagio en la UCSS, se establece lo siguiente:

Artículo 8°. Criterios de evaluación de originalidad de los trabajos y aplicación de filtros

El porcentaje de similitud aceptado en el informe del software antiplagio para trabajos para optar grados académicos y títulos profesionales, **será máximo de veinte por ciento (20%) de su contenido, siempre y cuando no implique copia o indicio de copia.**

## **DEDICATORIA**

Al todo poderoso que ha permitido llegar a este mundo con un fin y propósito, momento tan importante para mi formación personal y profesional, con mucha bondad y amor.

A mi bella hijita Chloe Alessandra, por ser mi motivo de lucha y superación diaria y a mis padres por haberme concebido y hacer posible que se cumpla los planes de Dios con su arduo trabajo, desveladas constantes estoy donde estoy y tengo los valores y principios que tengo.

A mis hermanos que a diario me presionan para culminar mi tesis y verme ya toda una Ingeniera. Todo este trabajo fue realizado con gran amor y va dirigido para toda mi familia.

**Rachel Cristina Ramírez Rufino**

A mis padres por trabajar duro para que pueda culminar mis estudios superiores, por su motivación diaria, sus valores, principios inculcados desde tener uso de razón, por su constante presión para obtener el grado de Ingeniera, por ser ejemplo de sacrificio desmedido, que causa en mi trabajar más duro para darles una vida de calidad.

A mis parientes y sobre todo a mi hermanito que con su bella sonrisa alegra mis días.

Al Doctor Geomar Vallejos Torres que nos incentivó, motivación y por ser guía con sus amplios conocimientos durante todo el proceso y etapa de investigación y así haber podido culminar con mucho éxito.

**María Cleofe Córdova Riva**

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar, agradezco al ser omnipotente por bendecirnos la vida, por permitirme culminar con éxito uno de mis sueños, brindándome; fortaleza, sabiduría, perseverancia a lo largo de toda mi carrera.

A mis padres, quienes han sido un pilar fundamental para el logro de mis objetivos, por el apoyo moral y económico, por su comprensión, motivación, dedicación que me han brindado, depositando toda su confianza en mí, y ayudándome a crecer como persona y luchar por lo que quiero.

Al asesor de tesis, Doctor Geomar Vallejos Torres, por compartir sus sabios conocimientos científicos, su tiempo de dedicación y paciencia para la elaboración y culminación de mi carrera profesional.

**Rachel Cristina Ramírez Rufino**

Agradecer en primer lugar al ser omnipotente por haberme dado la dicha de existir en este mundo, brindándome su amor puro, verdadero e incondicional, guiándome por el buen sendero, y sobre todo dándome fortaleza de seguir adelante, sin caer en el intento.

A mis padres, hermana, quieren con su ardua labor me inculcaron la responsabilidad; el deseo de triunfar y superarme; por el apoyo inmensurable e incondicional que me sirvió para ser un profesional de éxito; así mismo a mis educandos, compañeros y la casa de estudio que me vio crecer con los conocimientos otorgados.

Al Doctor Geomar Vallejos Torres, por encaminarnos desde el día uno hasta el final.

**María Cleofe Córdova Riva**

# ÍNDICE GENERAL

	Pág.
ÍNDICE GENERAL .....	viii
ÍNDICE DE TABLAS .....	x
ÍNDICE DE FIGURAS .....	xi
ÍNDICE DE APÉNDICES .....	xii
RESUMEN .....	xiii
ABSTRACT .....	xiv
INTRODUCCIÓN .....	1
OBJETIVOS .....	3
CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO .....	4
1.1 Antecedentes .....	4
1.1.1. Perspectiva internacional .....	4
1.1.2. Perspectiva Nacional .....	8
1.2. Bases teóricas especializadas .....	11
1.2.1 Origen y taxonomía del arroz .....	11
1.2.2 Descripción botánica del arroz .....	11
1.2.3 Producción y consumo de arroz en el Perú .....	11
1.2.4 Cadmio en arroz .....	12
1.2.5 Efecto del cadmio en arroz .....	12
1.2.6 Cadmio en suelos .....	13
1.2.7 Cadmio en los vegetales .....	13
1.2.8 Cadmio y potencial de hidrógeno(pH) de los suelos .....	14
1.2.9 Simbiosis de hongos micorrízicos arbusculares en vegetales .....	14
1.2.10 Micorrizas arbusculares y su efecto en el cadmio en vegetales .....	15
CAPÍTULO II. MATERIALES Y MÉTODOS .....	16
2.1. Diseño de la investigación .....	16
2.2. Lugar y fecha .....	16
2.3. Descripción del experimento .....	17
2.3.1. Propagación de micorrizas arbusculares .....	17
2.3.2. Preparación de medio de crecimiento y aplicación de dosis de cadmio .....	18
2.4. Tratamientos .....	22
2.5. Unidades experimentales .....	23

2.6. Identificación de las variables y su mensuración.....	23
2.7. Diseño estadístico del experimento.....	24
2.8. Análisis estadísticos de datos .....	24
2.9. Materiales y equipos .....	25
CAPÍTULO III: RESULTADOS .....	26
3.1. Efecto de la colonización por HMA en suelos con y sin presencia de cadmio en cultivos de arroz en San Martín. ....	26
3.1.1. Análisis de varianza para la colonización micorrízica .....	26
3.1.2. Prueba de Tukey para la colonización micorrízica.....	27
3.2. Efecto de los HMA en la biorremediación de cadmio en el sistema radicular y tallos de plantas de “arroz” <i>Oryza sativa</i> en San Martín .....	29
3.2.2. Prueba de Tukey el cadmio en raíces .....	30
3.3. Cadmio en tallos ( $\text{mg.kg}^{-1}$ ) en relación con los factores HMA y cadmio en plántones de arroz.....	31
3.3.1. Análisis de varianza para el cadmio en brotes.....	32
3.3.2. Prueba de Tukey para el cadmio en brotes de arroz .....	32
3.4. Potencial de Hidrógeno(pH) del suelo en relación con los HMA y cadmio en plántones de arroz .....	33
3.4.1. Análisis de varianza para el potencial de hidrógeno(pH).....	34
3.4.2. Prueba de Tukey para el potencial de hidrógeno(pH) del suelo.....	34
4.1. Colonización micorrízica (%) en relación con el cadmio en plántones de “arroz” .....	36
4.1.1. Análisis de varianza para la colonización micorrízica .....	36
4.2. Cadmio en raíces ( $\text{mg.kg}^{-1}$ ) en relación con los factores HMA y cadmio en plántones de arroz.....	37
4.2.1. Análisis de varianza para el cadmio en raíces .....	37
4.4.1. Análisis de varianza para el potencial de hidrógeno(pH).....	40
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES .....	42
CAPÍTULO VI: RECOMENDACIONES .....	43
REFERENCIAS .....	45
TERMINOLOGÍA .....	60
APÉNDICES .....	62

## ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
<i>Tabla 1</i> Descripción de los tratamientos en estudio .....	22
<i>Tabla 2</i> Identificación de Variables y su mensuración .....	24
<i>Tabla 3</i> Colonización micorrízica obtenida por tratamientos .....	26
<i>Tabla 4</i> ANOVA para la colonización micorrízica (%) en relación con los factores A: HMA y B: cadmio ...	27
<i>Tabla 5</i> Promedios del contenido de cadmio en raíces de <i>O. sativa</i> .....	29
<i>Tabla 6</i> ANOVA para cadmio en raíz ( $\text{mg.kg}^{-1}$ ) en relación con los factores A: HMA y B: cadmio.....	30
<i>Tabla 7</i> Promedios del contenido de cadmio en brotes de <i>O. sativa</i> .....	31
<i>Tabla 8</i> ANOVA para el cadmio en brotes ( $\text{mg.kg}^{-1}$ ) en relación con los factores A: HMA y B: cadmio.....	32
<i>Tabla 9</i> Promedios del pH en suelos contaminados con Cd .....	33
<i>Tabla 10</i> ANOVA para el potencial de hidrogeno con los factores: Factor A: HMA y factor B: cadmio .....	34

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 <i>Mapa de ubicación del estudio</i> .....	17
Figura 2 <i>Propagación de esporas de hongos micorrízicos arbusculares (HMA)</i> .....	18
Figura 3 <i>Repique del arroz a suelos contaminados con Cd</i> .....	19
Figura 4 <i>Evaluación de la colonización micorrízica</i> .....	20
Figura 5 <i>Preparación de las raíces teñidas de arroz para la colonización micorrízica</i> .....	20
Figura 6 <i>Muestreo de raíces y brotes de arroz para determinación del cadmio</i> .....	21
Figura 7 <i>Muestreo de suelo para caracterización física química</i> .....	22
Figura 8 <i>Efecto de la colonización por hongos micorrízicos arbusculares en suelos con y sin presencia de cadmio en cultivos de arroz en San Martín</i> .....	28
Figura 9 <i>Influencia de HMA, compost y Cd en raíces</i> .....	31
Figura 10 <i>Influencia de HMA, compost y Cd en el Cd en brotes</i> .....	33
Figura 11 <i>Influencia HMA y cloruro en el potencial de hidrógeno(pH) de suelos en O. sativa</i> .....	35

## ÍNDICE DE APÉNDICES

	Pág.
Apéndice 1. <i>Colonización en raíces, medido en el estereoscopio y microscopio binocular</i> .....	62
Apéndice 2. <i>Promedio de datos del contenido de cadmio en raíces y tallos, colonización y potencial de hidrógeno(pH)</i> .....	62
Apéndice 3. <i>Prueba de normalidad de datos mediante Shapiro Wilk</i> .....	63
Apéndice 4. <i>Prueba de homocedasticidad u homogeneidad de varianzas mediante Levine para Cadmio en raíz</i> .....	63
Apéndice 5. <i>Prueba de homocedasticidad u homogeneidad de varianzas mediante Levine para Cadmio en tallo</i> .....	63
Apéndice 6. <i>Prueba de homocedasticidad u homogeneidad de varianzas mediante Levine para colonización</i> .....	64
Apéndice 7. <i>Prueba de homocedasticidad u homogeneidad de varianzas mediante Levine para potencial de hidrógeno(pH)</i> .....	64

## RESUMEN

El presente trabajo de investigación mostró el efecto de la biorremediación con micorrizas arbusculares para minimizar el cadmio en “arroz” *Oryza sativa*, desarrollado bajo condiciones de vivero en la Región San Martín, aplicando un diseño experimental con arreglo bifactorial: 2A (Inoculación de micorrizas arbusculares) x 2B (Niveles de Cd), con un total de cuatro tratamientos y cada una de estas estuvo conformada por tres repeticiones: conformando 12 unidades experimentales. Se mostró que la colonización de los hongos arbusculares aumentaron cuando se aplicaron las micorrizas (tratamiento 3), llegando a tener una concentración de 85 %; existiendo niveles más altos de Cd en raíces ( $10,68 \text{ mg.kg}^{-1}$ ) en los tratamientos donde se aplicó Cd. Mientras que la concentración cambió cuando se agregó micorrizas al tratamiento con Cd, encontrándose valores de Cd ( $8,33 \text{ mg.kg}^{-1}$ ) en raíces (tratamiento 4). El volumen de Cd en brotes fue mayor cuando el tratamiento recibió cadmio, en donde se obtuvo una acumulación de  $1,84 \text{ mg.kg}^{-1}$  en el tratamiento 2. Pero al aplicar los HMA, los niveles de Cd disminuyeron a  $1,65 \text{ mg.kg}^{-1}$  (tratamiento 4). Finalmente, la utilización de HMA minimiza la concentración de cadmio en “arroz en la región San Martín.

Palabras Clave: Biorremediación, cadmio, micorrizas arbusculares, *Oryza sativa*.

## ABSTRACT

The present research work showed the effect of bioremediation with arbuscular mycorrhizae to minimize cadmium in *Oryza sativa* “rice”, developed under nursery conditions in the San Martín Region, applying an experimental design with a two-factor arrangement: 2A (Inoculation of arbuscular mycorrhizae ) x 2B (Cd Levels), with a total of four treatments and each of these was made up of three repetitions: making up 12 experimental units. It was shown that the colonization of arbuscular fungi increases when mycorrhizae are applied (treatment 3), reaching a concentration of 85 %; There were higher levels of Cd in roots (10.68 mg.kg<sup>-1</sup>) in the treatments where Cd was applied. While the concentration changed when mycorrhizae were added to the Cd treatment, Cd values were found (8.33 mg. kg<sup>-1</sup>) in roots (treatment 4). The volume of Cd in shoots was greater when the treatment received cadmium, where an accumulation of 1.84 mg.kg<sup>-1</sup> was obtained in treatment 2. But when applying the HMA, the Cd levels decreased to 1.65 mg.kg<sup>-1</sup> (treatment 4). Finally, the use of HMA minimizes the concentration of cadmium in “rice in the San Martín region.

Keywords: Bioremediation, cadmium, arbuscular mycorrhizae, *Oryza sativa*.

## INTRODUCCIÓN

La región San Martín actualmente ha venido ganando importancia de manera muy dinámica en la producción de arroz, el cual se estima en un 25 % su participación en el 2021, seguido por la región de Piura y la Libertad con 17 y 13 % respectivamente (Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego [MIDAGRI], 2021). Bajo estas condiciones se requiere de grandes extensiones y abundante agua para su desarrollo; por lo que, se abastecen de diferentes fuentes hídricas extraídos desde los ríos, por lo cual también se requiere de enormes cantidades de fertilizantes químicos para poder desarrollarse y completar su periodo fenológico; generando una preocupación debido a la aparición de metales pesados, como es el Cd (Chavez *et al.*, 2015). –

El Cd ingresa al cultivo mediante el suelo y parte aérea donde recibe dosis altas de fertilizantes (Bolan *et al.*, 2014), estas ingresan por las raíces hacia los órganos del cultivo, posicionándose en los granos y finalmente llega al organismo mediante la ingesta que a diario se realiza en las personas y que podría complicar la salud debido al metal tóxico (Shah *et al.*, 2018). El Cd es un elemento tóxico (Torres *et al.*, 2018) que afecta la salud del hombre y a la vez los ecosistemas, generando contaminaciones residuales al medio ambiente que en muchas ocasiones es duradera su descomposición. Estudios fisiológicos indican cuatro procesos principales de transporte para la concentración de Cd en el arroz: (1) absorción de Cd en la raíz, (2) translocación de raíz a brote por el flujo del xilema, (3) redirección en los nudos y (4) removilización desde las hojas (Mori *et al.*, 2009).

El cultivo de arroz es un alimento importante dentro de la canasta familiar peruana y de todo el mundo (Liu *et al.*, 2013), lamentablemente este cultivo es una fuente de Cd en la dieta alimenticia del hombre (Deng *et al.*, 2020). El traslado del Cd desde los suelos a los granos en el arroz es 0,300-1,112 mg.kg<sup>-1</sup> (Song *et al.*, 2015) con concentraciones de este elemento en los granos de arroz variando des 0,062 ± 0,128 mg.kg<sup>-1</sup> (Song *et al.*, 2017). Por otro lado el consumo de arroz es considerado la vía más importante de exposición al Cd en humanos (Li *et al.*, 2014). Este elemento, es principalmente absorbido por las raíces llegando a posicionarse en los granos; por lo tanto, el consumo del arroz podría generar serios

problemas de salud al hombre (Hu *et al.*, 2013). Este metal penetra por raíces finas, subiendo hasta las partes vegetativas y granos.

Ante esta problemática existen mecanismos de biorremediación empleando diversos microorganismos, siendo uno de los potenciales el uso de hongos micorrízicos ubicados en los suelos, que tienen la capacidad potencial de inmovilizar metales en las hifas (Beltrán y Gómez, 2016).

La razón que nos llevó a realizar esta investigación de las micorrizas en las plantas de arroz con Cd fue debido a que existen reportes internacionales que el arroz empleado en la dieta alimenticia presenta Cd (Deng *et al.*, 2020), el cual es acumulado en la sangre, inhibiendo en oxígeno a los pulmones y que su única finalidad de este hongo es eliminar todo este metal pesado de la planta y así poder llevar a casa un producto de calidad sin alterar, afectar la salud y el bienestar del hombre.

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo general**

Evaluar el efecto de la aplicación de micorrizas arbusculares en la biorremediación del cadmio en “arroz” *Oryza sativa* en vivero de la Región San Martín.

### **Objetivos específicos**

- Evaluar el efecto de la colonización por hongos micorrízicos arbusculares (HMA) en suelos con y sin presencia de cadmio en cultivos de arroz en San Martín.
- Evaluar el efecto de los hongos micorrízicos arbusculares en la biorremediación de cadmio en el sistema radicular y tallos de plantas de “arroz” *Oryza sativa* en San Martín.
- Evaluar el efecto del potencial de Hidrógeno(pH) en suelos micorrizados y contaminados con cloruro de cadmio en cultivos de arroz en San Martín.

# CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO

## 1.1 Antecedentes

### 1.1.1. Perspectiva internacional

Zhang *et al.* (2022) en su publicación “Avances de investigación en absorción, transporte y resistencia del Cd en el cultivo de arroz”, en China; tuvieron como objetivo investigar la absorción, transporte y resistencia de cadmio en arroz. Como parte de la metodología revisaron estudios sobre la captación de Cd mediada por transportadores, absorción de Cd afectada por factores ambientales, transporte de Cd desde las raíces hasta los brotes, transporte de Cd de los órganos vegetativos a los granos y resistencia del arroz al cadmio; para el estudio emplearon un diseño no experimental con revisiones bibliográficas de diferentes artículos indizadas en la base de datos de SCOPUS, Web of Science, Scielo, etc. Los resultados encontrados indicaron que la planta de arroz absorbe Cd por las raíces, lo que está mediado por transportadores relacionados con la absorción de Cd, incluidos OsNramp5, OsNramp1, OsCd1, OsZIP3, OsHIR1, OsIRT1 y OsIRT2. Tal como lo demuestran, la absorción de Cd afectó los factores ambientales del suelo, como las concentraciones de Cd y algunos otros iones en el suelo, las propiedades del suelo y otros factores que pueden afectar la biodisponibilidad de Cd en el suelo, transportándose dentro de las plantas de arroz mediado por OsZIP6, OsZIP7, OsLCD, OsHMA2, CAL1, OsCCX2, OsLCT1 y OsMTP1, de raíces a brotes y de brotes a granos. Por otro lado, los autores concluyeron que para contrarrestar o resistir a la toxicidad del Cd, el arroz presenta muchas estrategias de resistencia, incluida la deposición de Cd en las paredes celulares, el secuestro vacuolar de Cd, la quelación de Cd, la antioxidación y la salida de Cd.

Lien *et al.* (2021) investigando los “Niveles de cadmio en arroz (*Oryza sativa*), en Taiwan” tuvieron como objetivo evaluar los niveles de Cd en el arroz para determinar los riesgos para la salud asociados con el consumo de arroz en varios subgrupos de edad y género. Se usaron 1581 muestras de arroz de diferentes asociaciones de agricultores locales en áreas de producción y luego se tomaron muestras aleatorias de los mercados locales. Las muestras fueron selladas en bolsas plásticas, de al menos 600 g por muestra. La simulación de Monte Carlo, fue usado para estimar la distribución de la concentración de Cd, la dosis diaria promedio de por vida (LADD) y el índice de riesgo (HI). El programa SPSS versión 10.0 (SPSS Inc., Chicago, IL, EE. UU.) se usó para examinar los datos. A su vez, utilizando un diseño no experimental, calcularon los valores medio, mínimo y máximo, así como la desviación estándar para describir el contenido de Cd en las muestras de arroz. Él estudió encontró que los hombres de 19 a 65 años consumían arroz en promedio de 0,06 µg/kg de peso corporal por día, con un índice de riesgo (IR) 50, 90, y los percentiles 95 de 0,16, 0,69 y 1,54 respectivamente. Los autores llegaron a la conclusión de que el área de Yilan presentaba la exposición más alta de Cd, con un IR de 0,64. De modo general, los niveles actuales de Cd en el arroz consumido en Taiwan no son un problema de seguridad y salud pública en la dieta alimenticia.

Chen *et al.* (2019) en el estudio “Los hongos micorrízicos arbusculares y la comunidad bacteriana asociada influyen en la absorción de cadmio en el arroz” que se desarrolló en China; tuvieron como objetivo investigar cómo la gestión del agua puede reducir las concentraciones de Cd en los granos de arroz. La técnica consistió en recolectar semillas de arroz de la Academia de Ciencias Agrícolas de Shanghai, en China. Las semillas fueron desinfectadas con agua oxigenada (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) al 10% durante 15 min y luego lavadas dos veces con abundante agua destilada. Las semillas fueron germinadas en un invernadero, a humedad relativa de 80-85 %. Y temperaturas diarias día/noche de 28/22 °C. En el estudio, el arroz se inoculó con *Funneliformis mosseae* (Fm) o *Rhizophagus intraradices* (Ri) en suelos contaminados con 0 y 10 mg kg<sup>-1</sup> de suelo. El estudio utilizó un diseño experimental de 3x2 con seis tratamientos. Las medias derivadas de cada tratamiento se compararon usando la prueba t de Student. Investigaron la colonización por HMA, biomasa vegetal, contenido de Cd y las características del suelo en planta de arroz. Los resultados del estudio mostraron que los HMA disminuyeron significativamente las concentraciones de Cd en raíces y brotes (P<0,05). La mayor cantidad de Actino bacteria (principalmente del género *Arthrobacter*)

se encontró en el tratamiento con RiA, es probable que absorbieran Cd en la superficie, lo que redujo la disponibilidad de metales pesado para el arroz. Además, se registró una tasa de colonización del 32 al 35 % en los inoculados con Fm. Los autores descubrieron que, en condiciones controladas, las plantas de arroz en vivero pudieron reducir completamente la absorción de Cd por los hongos micorrízicos.

Kanu *et al.* (2017) investigando la “Absorción y distribución de Cd en genotipos de arroz aromático y consecuencias relacionadas en características de rendimiento y calidad del grano” en China, como objetivo, fue analizar el desarrollo de plantas y el impacto del Cd bajo condiciones de invernadero entre los años 2015 y 2016. La metodología usó un modelo de bloques completos al azar que incluyó cinco cultivares de arroz fragantes distintos (Meixiangzhan 2, Xiangyaxiangzhan, Guixiangzhan, Basmati y Nongxiang 18) y cuatro fases de Cd (0; 50; 100 y 150 mg.kg<sup>-1</sup> de suelo). Desarrollaron un diseño experimental en condiciones controladas con diferentes tratamientos de Cd; los datos obtenidos en este estudio se analizaron usando Microsoft Excel 2007 y sometido a un análisis de varianza (ANOVA) de una vía y se compararon las diferencias de medias con LSD de Fisher. Los hallazgos demostraron que la aplicación de Cd en el suelo aumentó el contenido de Cd en las raíces y otros órganos. Debido al aumento de la toxicidad del Cd, la absorción y acumulación fueron mayores en las raíces que en los brotes. Los autores llegaron a la conclusión de que la toxicidad del Cd tuvo un impacto en la formación del rendimiento del arroz y la calidad del grano al alterar la productividad en cuanto al número de panículas, espiguillas por panículas y porcentaje de fraguado de las espiguillas (%); sin embargo, la variedad Guixiangzhan tuvo un mejor desempeño, mientras que la Meixiangzhan 2 tuvo un desempeño menor en términos de absorción mínima de Cd y distribución a los granos, rendimiento y reducción de la calidad del grano.

Luo *et al.* (2017) en su artículo “El hongo micorriza arbuscular afecta la absorción de cadmio y las formas químicas en el arroz en diferentes etapas de crecimiento”, desarrollado en China, como objetivo tuvieron que reducir la absorción y acumulación de Cd en el arroz y la mejora en el crecimiento y la calidad del grano. La metodología consistió en utilizar cuatro períodos de crecimiento (macollamiento, unión, floración y maduración). Las semillas de arroz fueron obtenidas de la Academia de Henan de Ciencias Agrícolas, Zhengzhou, PR China. Estas

fueron esterilizadas con agua destilada al 10 % durante 15 min y pasaron a lavar con agua esterilizada. Posteriormente, lo germinaron en papeles de filtros húmedos y cultivados en solución nutritiva de Hoagland-Arnon al 20 %. Después de 1 semana de germinación, utilizaron las plántulas uniformes de arroz. En el estudio emplearon dos concentraciones de Cd en suelo referente a 0,2 y 10 mg.kg<sup>-1</sup>. Emplearon un diseño experimental, probados mediante análisis de varianza ANOVA de tres vías usando el paquete estadístico SPSS; a su vez utilizaron pruebas de Tukey al 5 % de probabilidad para comparaciones de post HOC. Los resultados indicaron que las interacciones entre la producción del arroz, los niveles de CdCl<sub>2</sub> en el suelo y la inoculación de micorrizas arbusculares, tuvieron efectos significativos (P<0,001) en la biomasa de las raíces, brote del arroz y el Cd de la raíz del vegetal. Las tasas de colonización de raíces fluctuaron con las etapas de crecimiento, alcanzando su punto máximo en la etapa de unión y luego disminuyendo en las etapas de floración y maduración. Los HMA aumentaron el rendimiento de grano en la planta de arroz cultivada en suelo con 10 mg de Cd.kg<sup>-1</sup>. El estudio concluyó que las fases de floración y maduración eran períodos importantes donde los HMA limitaron los niveles de CdCl<sub>2</sub> en el grano del arroz.

Jara y Rueda (2020) evaluando los “Niveles de cadmio en cultivos de arroz a nivel de suelo y grano en el Municipio De Granada Meta”, ubicado en Colombia; plantearon como objetivo evaluar la presencia de cadmio (Cd) en un cultivo de arroz a nivel de suelo, antes y después de la siembra, y en el grano cosechado. La metodología consistió en obtener muestras de suelo y de arroz paddy en campo. Después, fueron trasladados a un laboratorio certificado por el Instituto Colombiano Agropecuario (ICA), por medio de la técnica ICP-OES, para la identificación y conteo de los desechos metálicos de manera especial en las fases requeridas. Los autores emplearon un diseño no experimental por comparación simple directa de los niveles de concentración en las muestras; empleando concentraciones máximas recomendadas por la normatividad relacionada y con las dosis seleccionadas de estudios toxicológicos del Cd. Los resultados que obtuvieron indicaron que la superficie del suelo posee un contenido de Cd con valores de 0,01-2 mg.kg<sup>-1</sup>, datos estimados como normales para suelos según United States-Environmental Protection Agency (US EPA). Asimismo, encontraron concentraciones de Cd (cadmio) en arroz paddy superior a los niveles establecidos por la FAO de 0,4 mg.kg<sup>-1</sup>, con concentraciones de 10,4 y 38,8 mg.kg<sup>-1</sup> en el tejido foliar. Los autores concluyeron que se deben utilizar la fitorremediación para reducir

el contenido Cd en la superficie del suelo y en la planta, para asegurar la salubridad del arroz, la salud y la calidad.

### 1.1.2. Perspectiva Nacional

Zhunaula *et al.* (2021) estimando el “Contenido de arsénico en arroz comprado en los mercados peruanos y estimación de la ingesta dietética de los peruanos a través del consumo de arroz”, realizado en el Perú; cuantificaron el arsénico total (tAs) en 31 arroces domésticos (arroz blanco, n=19; arroz integral, n=7; arroz sancochado, n=5). La metodología consistió en comparar el tAs con los límites máximos establecidos por las autoridades reguladoras. Los autores realizaron una comparación entre la ingesta dietética (DI), la exposición dietética (ED) y el margen de exposición (ME). Las concentraciones de tAs en arroz blanco, integral y sancochado fueron  $0,292 \pm 0,106 \text{ mg.kg}^{-1}$ ,  $0,401 \pm 0,081 \text{ mg.kg}^{-1}$ ,  $0,229 \pm 0,03 \text{ mg.kg}^{-1}$ . Para encontrar diferencias significativas, el estudio utilizó una ANOVA unidireccional y la prueba de post hoc de Tukey. El programa gratuito CRAN R versión 3.2.6 analizó los análisis estadísticos. Los hallazgos indicaron que la cantidad de arsénico presente en arroz blanco excedió los límites recomendados por la FAO/OMS ( $0,20 \text{ mg.kg}^{-1}$ ) y la legislación europea ( $0,25 \text{ mg.kg}^{-1}$ ), pero no los límites del Mercosur ( $0,3 \text{ mg.kg}^{-1}$ ). Según la ED, los peruanos consumen en promedio  $5,60 \mu\text{g As.kg}^{-1} \text{ PC}$  por semana. En el nivel medio de exposición dietética, el valor del ME fue superior a 1. Los resultados indicaron que la población peruana no tiene un alto riesgo de exposición al arsénico en la dieta. Sin embargo, es necesario llevar a cabo estudios adicionales para reducir la exposición al arsénico en la dieta peruana.

Vallejos-Torres *et al.* (2022) en el estudio “El efecto combinado de hongos micorrízicos arbusculares y compost mejora el crecimiento, los parámetros del suelo y disminuye la absorción de cadmio en plantas de cacao (*Theobroma cacao* L.)” realizado en Tarapoto, San Martín. Tuvieron como objetivo investigar la inoculación de hongos micorrízicos arbusculares (HMA) y la enmienda orgánica afectan las plantas de cacao en suelos contaminados con Cd. El estudio se llevó a cabo en macetas para estudiar como la inoculación de HMA, la aplicación de compost (CP) y la adición de cadmio (Cd) afectaron el crecimiento de las plantas. El experimento se llevó a cabo en un diseño factorial  $2 \times 2 \times 2$  con tres repeticiones en el que se agregó Cd ( $0$  y  $5 \text{ mg.kg}^{-1}$ ), compost ( $0$  y  $200 \text{ g/plantas}$ ) e inoculación con HMA. Una mezcla de esporas de las siguientes especies de HMA: *Glomus*

*hoi*, *Rhizoglosum* sp., *Diversispora aurantia* y *Acaulospora* sp. Los resultados indicaron que la combinación de HMA + CP mejoró el crecimiento vegetal. El tratamiento HMA + CP disminuyó la cantidad de Cd en los tallos de cacao. El tratamiento combinado HMA+ CP, fue el más efectivo para aumentar el pH, la materia orgánica y el contenido de fósforo disponible en el suelo. Los autores reportaron que la adición de compost con HMA disminuyó la colonización de raíces por HMA y el micelio extraradical en la misma medida que los tratamientos con Cd.

En el estudio llamado “Multiplicación de hongos micorrízicos arbusculares aislados de suelos cultivados con cacao” Vallejos-Torres *et al.* (2022) buscaron multiplicar esporas de HMA utilizando cultivos trampa como arroz y maíz, obtenidos de suelos recolectados en fincas de cacao en la región de San Martín, Perú. La técnica se enfocó en maximizar la producción y el manejo de esporas en condiciones ambientales controladas. El experimento se llevó a cabo en condiciones de invernadero con un diseño completamente al azar, tomándose en cuenta tres fuentes de inóculo de HMA obtenidas en la provincia de Mariscal Cáceres, Lamas y Rioja, en dos periodos 110 y 220 días, así como dos cultivos hospedantes (maíz y arroz). Un volumen de área y tres volúmenes de suelo agrícola se mezclaron y se colocaron en cajones. La población de esporas, la colonización micorrízica, la altura de la planta hospedera y el peso seco de la parte aérea y la raíz se utilizaron como variables. Los resultados demostraron que el arroz es un buen huésped y multiplica más esporas de HMA. El inóculo de micorrizas de Mariscal Cáceres, multiplicado con plantas de arroz a los 220 días, mostró la población de esporas más alta. Los autores llegaron a la conclusión de que, debido a su alta capacidad de reproducción, el arroz podría utilizarse como planta trampa para la propagación masiva de HMA

Cucufate (2017) en el estudio “Cuantificación de la ingesta de cadmio a través del consumo de *Oryza sativa* (arroz pulido) comercial cocido por los habitantes” en Lima; tuvo como objetivo cuantificar el CdCl<sub>2</sub> en arroz consumido por una persona de Lima. La metodología consistió en emplear la descripción correlacional de dos etapas: a) Sondeo para determinar la adquisición de arroz en 386 personas y b) Determinación del Cd por espectrofotometría de absorción y al mismo tiempo el cálculo del nivel de consumo de *O. sativa* por semana. En la primera etapa, realizaron una encuesta para evaluar el consumo de arroz en 386

personas que habitan en los 13 distritos que conforman Lima Moderna y en la segunda fase realizaron el estudio de concentraciones de cadmio por espectrofotometría de absorción atómica en cuatro variedades de arroz pilado y crudo; al mismo tiempo estimaron el patrón de consumo de arroz semanal del poblador, la ingesta semanal y exposición al cadmio por vía oral. Los resultados obtenidos en el estudio mostraron que la media ingesta fue de 0,68  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  de peso corporal; al mismo tiempo, determinaron que la media de consumo por semana de arroz en Lima Moderna fue mayor en varones que en sexo femenino (1,13  $\text{kg}/\text{semana}$  y 0,48  $\text{kg}/\text{semana}$  respectivamente) y encontraron un bajo nivel de cadmio en *Oryza sativa* que viene de Uruguay (3,60  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ), seguido del arroz procedente de Lambayeque con un valor de 0,02  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  de cadmio, en tercer lugar se ubica el arroz que se produce en San Martín y Arequipa con un valor de 0,05  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  de cadmio y el *O. sativa* con más alto contenido de  $\text{CdCl}_2$  fue el integral con 0,18  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ . El autor concluyó que Cd en granos analizados no sobrepasa el valor establecido por la Unión Europea (0,20  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ), contrariamente para el arroz integral mostró valor cercano con (0,18  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ).

## **1.2 Bases teóricas especializadas**

### **1.2.1 Origen y taxonomía del arroz**

*Oryza sativa* fue cultivado hace 10 000 años atrás en países asiáticos (Japón, China y Corea del Sur). Este cereal es considerado como el alimento fundamental que nutre a media población a nivel mundial. Este grano contiene muchas más calorías que otros granos producidos. Pertenece a la Familia Poaceae (gramineae). El género *Oryza* cuenta con más de 24 especies nativas que producen en casi en todo el continente asiático, África, Sur y Centro América, así como en Australia. Estudios sustentan que la especie de *O. sativa* podría ser la especie *Nivara*, con procedencia del África tropical (Acevedo *et al.*, 2006).

### **1.2.2 Descripción botánica del arroz**

La planta de *Oryza sativa* presenta una estructura adaptada para el desarrollo en suelos con presencia de agua. Presenta un rayo seminal de vida corta y rayos secundarios que crean un fascículo poco profundo. Según las variedades los tallos son huecos, redondeados, con nudos y traques que varían en tamaño y número. Todo tallo tiene una hoja y una yema que pueden producir un nuevo tallo o macollo, que da lugar a nuevos macollos. Las hojas son largas, casi angulares y demasiado grandes. La lígula y las aurículas se insertan en la cabeza de la hoja. Las tres flores de las espiguillas son trifloras y hermafroditas, el último es fértil, mientras que los dos inferiores están formados por órganos vestigiales; reunidas en inflorescencias racimosas formando panículas. El fruto es una cariósipide con una semilla propiamente dicha, estructurada por el endospermo y el embrión. La longitud de la planta es muy variable y es dependiente de la variedad y la buena semilla, algunos cultivares alcanzan hasta los 7 m. Las nuevas variedades e híbridos presentan alturas bajas de 1 a 1,30 m con resistencia al acame (González, 1982).

### **1.2.3 Producción y consumo de arroz en el Perú**

Según el reporte de Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego MIDAGRI (2021), a causa del crecimiento demográfico, la producción de arroz se elevó a 3,1 % en los últimos años, al precio y al área cosechada de tan solo 0,8 % de un área mayor de 2,2 % anual. Sin embargo, esta producción no cumple las necesidades de la población, lo que promueve la

importación de arroz ya que la población crece aceleradamente considerado un consumo per cápita de 52 a 54 kg al año en el 2016.

#### **1.2.4 Cadmio en arroz**

El arroz, es un producto básico, muy importante en Asia (Liu *et al.*, 2014), desafortunadamente, este cultivo es eficiente en la absorción de Cd, siendo considerado como la principal vía de exposición del Cd en el hombre (Song *et al.*, 2017), por lo cual es motivo es una razón a tener en cuenta en Perú. Este elemento, tóxico para el hombre, es absorbido por las raíces, en donde para llegar al grano, tiene que atravesar la epidermis, exodermis, la corteza y la endodermis antes de llegar a la xilema de la raíz, luego, luego es translocado desde la corteza de la raíz hasta la xilema. Durante todo ese proceso, gran parte del Cd es translocado a través de la membrana de vacuola HMA3 (Ueno *et al.*, 2010), luego alcanza la xilema, para luego posteriormente ser distribuido a las hojas y granos (Li *et al.*, 2017).

#### **1.2.5 Efecto del cadmio en arroz**

El Cd es un metal que afecta grandemente al cultivo de arroz, el cual viene generando un gran interés, sobre todo una preocupación a nivel mundial debido a que es dañino para la salud también por ser altamente móvil en la cadena alimenticia (Thévenod y Lee, 2013). El Cd tiene consecuencias dañinas en el crecimiento del cultivo, incluso en concentraciones relativamente bajas (Kanu *et al.* (2017) en donde valores de 1, 2 y 3 mg.kg<sup>-1</sup> de Cd en los suelos disminuye el rendimiento de grano en un 34, 43 y 63 % respectivamente. Se ha informado que la toxicidad del Cd retrasa el desarrollo y la biomasa de las plantas de arroz (Wang *et al.*, 2014), reduciendo la formación de rendimiento y los elementos del rendimiento en términos de número de panículas, granos por panícula y granos llenos por panícula (Kanu *et al.*, 2017). El crecimiento, desarrollo y la tasa fotosintética del arroz se reducen en condiciones de estrés por Cd (Rizwan *et al.*, 2017), en donde también se ve afectado la altura de la planta, el peso fresco y la clorofila que también tiende a disminuir cuando están expuestas a la toxicidad del Cd (Wu *et al.*, 2010).

### 1.2.6. Cadmio en suelos

La principal fuente de acumulación de metales es el suelo, que sirve como barrera para evitar que los metales entren en el suministro de los alimentos (Acevedo *et al.*, 2021). El Cd es absorbido de manera fácil por el arroz cultivadas en suelos alterados con Cd y se traslada a los granos (Song *et al.*, 2015). La acumulación de Cd se rige por la disponibilidad biológica de Cd en la superficie y la capacidad propia de *Oryza sativa* (Grant *et al.*, 2008). Una alta concentración de Cd en la tierra cultivada es un problema ambiental serio ya que la toxicidad del Cd puede representar una amenaza para la seguridad alimentaria, impactando tanto el rendimiento como los componentes del rendimiento de las plantas de arroz (Herath *et al.*, 2014). Cui *et al.* (2016) aportó información sobre la utilización de diferentes métodos para detener el MP (metales pesados) en suelos alterados, como fosfatos, minerales arcillosos, materiales a base de calcio, biorremediación, etc. La biorremediación utiliza microorganismos, por ejemplo bacterias, hongos y algas (Rodríguez *et al.*, 2022).

La degradación de los suelos es actualmente uno de los casos ambientales más graves a nivel mundial (Bateman *et al.*, 2021), en donde la acción antrópica que induce una agricultura bastante intensiva, deforestación y actividades industriales resulta en un aumento del deterioro de este recurso influyendo en la compactación del suelo, pérdida de la fertilidad, pérdida del carbono orgánico, entre otros (Pereira *et al.*, 2018). Globalmente, los valores de Cd en suelos naturales radican entre 0,01 y 2,7 mg.kg<sup>-1</sup> (McLaughlin *et al.*, 1997), mientras que en suelos manejados el rango se extiende hasta 10,5 mg.kg<sup>-1</sup> (Prieto *et al.*, 2009).

### 1.2.7 Cadmio en los vegetales

La acumulación de Cd en las plantas tiende a cambiar su metabolismo y fisiología y, eventualmente, puede provocar su desaparición (Irfan *et al.*, 2013). Sin embargo, para evitar que ocurra un daño notable a su crecimiento y desarrollo, se debe incluir una cantidad significativa de esto. Los niveles elevados de Cd en las especies de plantas tienen un impacto en su composición elemental (Dalcorsio *et al.*, 2013). Por lo tanto, la ingesta de alimentos contaminado con Cd como el arroz plantea riesgos sustanciales para la salud. Sin embargo, Los hongos micorrizicos. Se sabe que los microorganismos del suelo cumplen un papel importante en las propiedades del suelo y el desarrollo de las plantas, lo que influye

significativamente en la absorción de metales pesados (Chen *et al.*, 2019). Además, las plantas se utilizan como biorremediadores para limpiar suelos contaminados. Esta tecnología podría ayudar a minimizar el volumen del metal pesado en los productos procesados y mejorar la capacidad de supervivencia de la planta hospedadora; sobre todo el cultivo de *Oryza sativa* que es un alimento consumido a diario y otras gramíneas de gran importancia como la alfalfa que es utilizada en la alimentación de animales domésticos, sugerido también para Fito estabilizar metales pesados en suelos contaminados (Motesarezadeh *et al.*, 2010).

### **1.2.8 Cadmio y potencial de hidrógeno (pH) de los suelos**

Generalmente, los niveles de Cd en los suelos están fuertemente relacionadas con el material parental, sin embargo, las actividades antrópicas pueden incorporar Cd al suelo, el cual luego es absorbido por la planta. En cacao, algunos estudios demostraron una fuerte relación entre Cd en granos y Cd total del suelo, en donde el pH del suelo influye en el aumento de este elemento en las plantas (Argüello *et al.*, 2019). El contenido de Cd en suelos está grandemente influenciado por el pH, contenido de materia orgánica, Capacidad de Intercambio de cationes y presencia de arcilla (Alloway, 2013), en donde uno de los componentes que tiene una fuerte influencia en el Cd es el pH, en donde al existir una disminución del pH, la absorción de Cd por las plantas tiene una tendencia a aumentar. El movimiento y la biodisponibilidad del cadmio se registran cuando el pH del suelo aumenta, porque es movilizado y adsorbido por los coloides del suelo (Huaraca-Fernandez *et al.*, 2020).

### **1.2.9 Simbiosis de hongos micorrízicos arbusculares en vegetales**

El mutualismo con hongos HMA, viene dándose en un 80 %, en gran parte son plantas cultivadas (Wipf *et al.*, 2019). Esta interacción micorrízica permite que las plantas mejoren sus recursos naturales y respondan mejor en los cambios de clima (Torres *et al.*, 2018), alteraciones por sequías (Symanczik *et al.*, 2018) o contaminación por elementos químicos altamente pesados (Torres *et al.*, 2018).

El mutualismo micorrízico induce a una mejor asimilación de nutrientes en las plantas, a su vez puede implicar en un aumento de absorción elementos no esenciales (Borda y Lahura, 2021). Sin embargo, la colonización de micorrizas en la planta inmoviliza a los elementos tóxicos dentro del micelio o raíz (Hildebrandt *et al.*, 2007), reduciendo sustancialmente el contenido de Cd en brotes (Zhang *et al.*, 2018) disminuyendo así los síntomas de estrés físico y químico, así como el retraso del crecimiento y producción de semillas. Por su parte, Restrepo *et al.* (2019) mostraron que el Cd (cadmio) no altera la colonización por HMA de las raíces de la soya, lo que indica que este metal no inhibe el establecimiento de simbiosis, por lo tanto, la colonización de raíces aumenta con la adición de Cd.

#### **1.2.10 Micorrizas arbusculares y su efecto en el cadmio en vegetales**

Diversas investigaciones mostraron que la simbiosis de HMA y vegetales, podrían minimizar la ubicación de metales pesados (MP) en cultivos de *O. sativa*, entendiéndose que la utilización de los HMA pueden llegar a ser un instrumento biotecnológico para la manipulación de métodos que se usan en la agricultura (Merlos *et al.*, 2016).

Algunas investigaciones reflejan la importancia y efecto simbiótico de las micorrizas arbusculares en el sistema suelo-planta, debido a que es una herramienta exitosa para reducir  $CdCl_2$  en sistemas de cultivos alterados por elementos químicos pesados (Merlos *et al.*, 2016). El arbusculo, la vesícula y la hifa son estructuras muy importantes que contrarrestan los metales (Hildebrandt *et al.*, 2007). Las micorrizas generan la proteína (glomalina) a través de las hifas que es una sustancia pegajosa con capacidad para atrapar partículas de suelo; traduciéndose en un potencial para generar enlaces con moléculas de inmensa toxicidad; de esa manera, podría constituirse en un buen obstáculo para retener este MP (metales pesados) (González-Chávez *et al.*, 2011).

## **CAPÍTULO II. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **2.1. Diseño de la investigación**

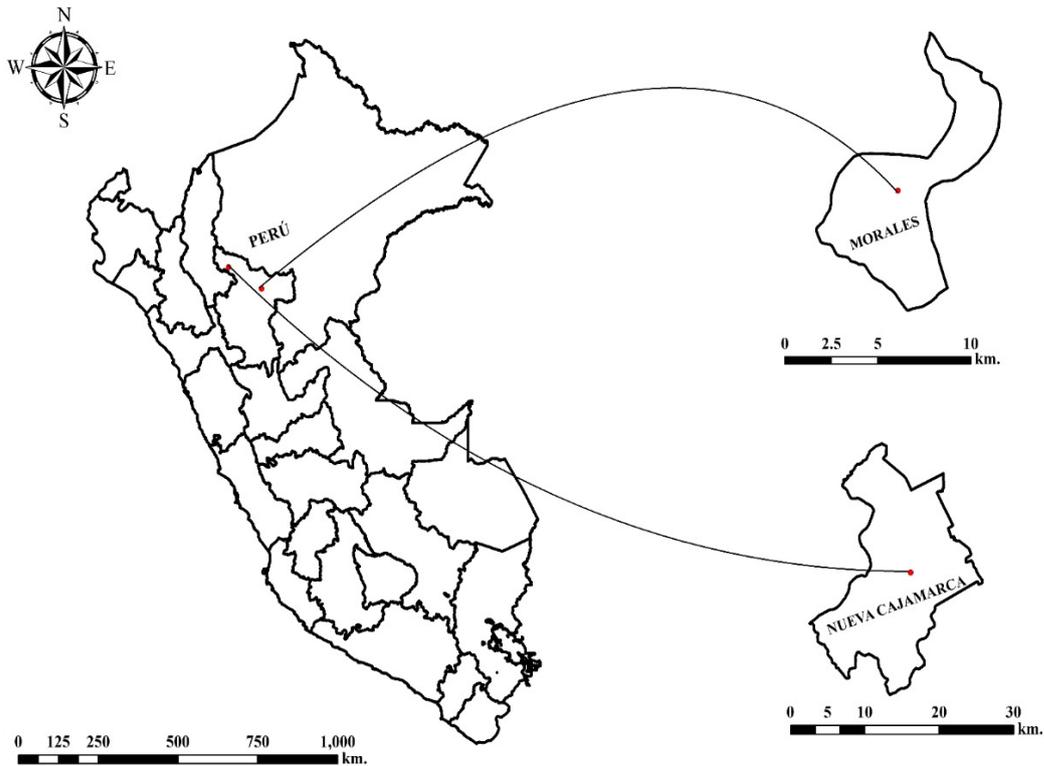
El presente trabajo de investigación tuvo un enfoque cuantitativo porque se registró valores numéricos por variables, bajo un diseño experimental y descriptivo. Además, esta investigación fue aplicada debido a que se evaluó el efecto de los HMA en la biorremediación del cadmio en el “arroz” *Oryza sativa*. De acuerdo con Hernández *et al.* (2014) el análisis cuantitativo comprueba la validez de la hipótesis planteada. Finalmente estuvo constituido por un diseño experimental conformado por tratamientos y unidades experimentales.

### **2.2. Lugar y fecha**

El estudio tuvo dos etapas; la primera corresponde a la multiplicación de ellos HMA que fue realizado antes del estudio en la Universidad Católica Sedes Sapientiae y la segunda etapa consistió en al desamarrarlo del estudio, llevado a cabo en la Universidad Nacional de San Martín, Perú, entre octubre del 2021 a marzo de 2022. Nueva Cajamarca tiene una altitud de 875 m s.n.m. y una temperatura media de 24 °C, mientras que Morales está localizada a una altura de 280 m s.n.m, con temperatura media de 24,6 °C (Figura 1). El ensayo estuvo instalado en un vivero con ingreso de luz solar de 50 % con cobertura de malla raschell.

## Figura 1

### Mapa de ubicación del estudio



*Nota.* Ubicación del estudio en los distritos de Morales y Nueva Cajamarca en las provincias de San Martín y Rioja.

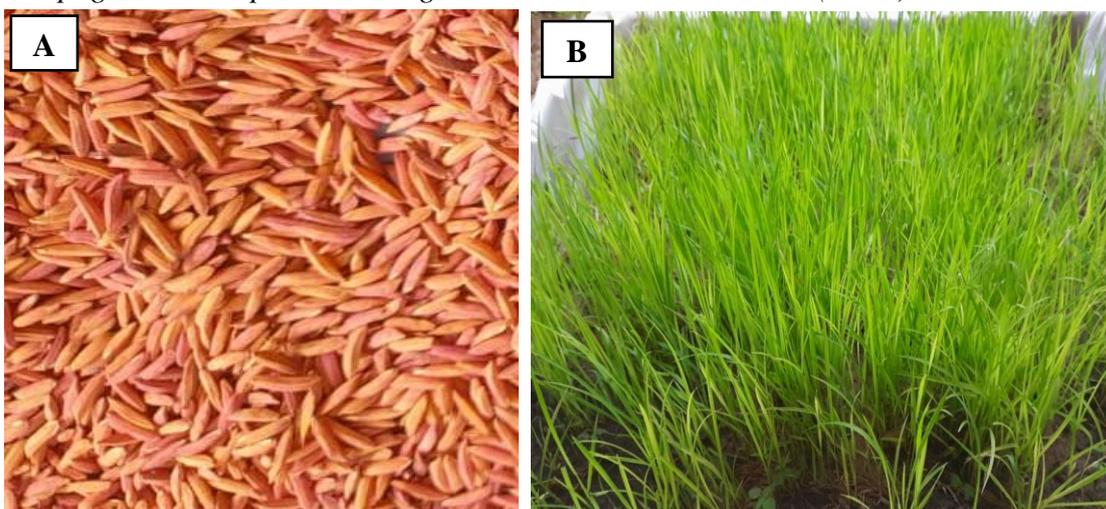
## 2.3. Descripción del experimento

### 2.3.1. Propagación de micorrizas arbusculares

El inóculo micorrízico conteniendo las esporas de HMA fueron propagadas 80 días antes del estudio y consistió en sembrar semillas de arroz, de variedad conquista en una proporción de 200 semillas por metro cuadrado del inóculo colectado en campo (Figura 2); luego de dos semanas de desarrollo, los vegetales se dispersaron a 75 por caja y se esparcieron en días alternos regularmente durante el proceso de crecimiento por un periodo de 60 días (Del Águila *et al.*, 2018). A los 20 días se sujetaron a una sequía de agua, consistiendo en secar toda el agua y así promover la muerte del hospedante; esto con el fin de propiciar el aumento de los hongos.

## Figura 2

### *Propagación de esporas de hongos micorrízicos arbusculares (HMA)*



*Nota.* (A) Semillas de arroz variedad Conquista y (B) Propagación de esporas de HMA empleando arroz como cultivo hospedero.

### **2.3.2. Preparación de medio de crecimiento y aplicación de dosis de cadmio**

Este estudio estuvo conformado por 2 fases, donde se añadió cadmio en proporción de 0 y  $5\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  por macetero. El Cd (cadmio) fue disuelto en agua destilada con el medio de crecimiento (sustrato mezclado de arena y suelo agrícola recogido en campo). Las plántulas de arroz fueron germinadas en sustratos previamente esterilizada en autoclave a  $131\text{ }^{\circ}\text{C}$  durante 2 horas el cual fueron regadas constantemente con agua destilada durante 20 días. Una vez que las plantas tenían aproximadamente entre 10 a 12 cm de altura, estas fueron trasplantadas a macetas de 3 kg de sustrato al cual se incorporó los dos niveles de cadmio (Figura 3). En el mismo momento que se repicó las plántulas de arroz se incorporó las esporas de hongos (Vallejos-Torres *et al.*, 2022).

### Figura 3

*Repique del arroz a suelos contaminados con Cd*



Nota. (A) Suelos inoculados con Cd y (B) Repique de plántulas de *Oryza sativa* en sustratos inoculados con Cd.

#### 2.3.3. Evaluación de la colonización micorrízica

Esta fase de tinción de raíces fue ejecutado usando procedimientos de Phillips y Hayman (1970). Las muestras han sido compuestas por raíces pequeñas (secundarias y terciarias) sacadas del arroz después de 80 días en vivero. Dichas raíces obtenidas en el muestreo fueron usados únicamente 20 segmentos de aproximadamente 1,5 cm de longitud, de tal manera que se colocaron en láminas porta objeto (10 raíces por cada campo), para su análisis en el microscopio.

La colonización micorrízica fue evaluada siguiendo la metodología de Brundrett *et al.*, (1996); método que consistió en fijar un segmento de la raíz para separarlo en 3 zonas de observación (superior, intermedio e inferior). Dicha zona se observó delicadamente y se registró en una hoja de apuntes; tanto la presencia y ausencia de estructuras micorrízicas (vesículas, arbuscúlos e hifas) (Figura 4). El procedimiento se realizó con 20 segmentos montados en la lámina portaobjeto con ayuda de un microscopio binocular en la medida de 40X (Figura 5).

**Figura 4**

*Evaluación de la colonización micorrízica*

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
✓	□	□	□	□	□	□	x	□	□	□	□	x	□	□	□	□	□	□	□
□	x	□	□	x	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	x	□	□	X	□
□	□	□	□	□	□	x	□	□	x	□	x	□	□	□	□	□	□	□	□

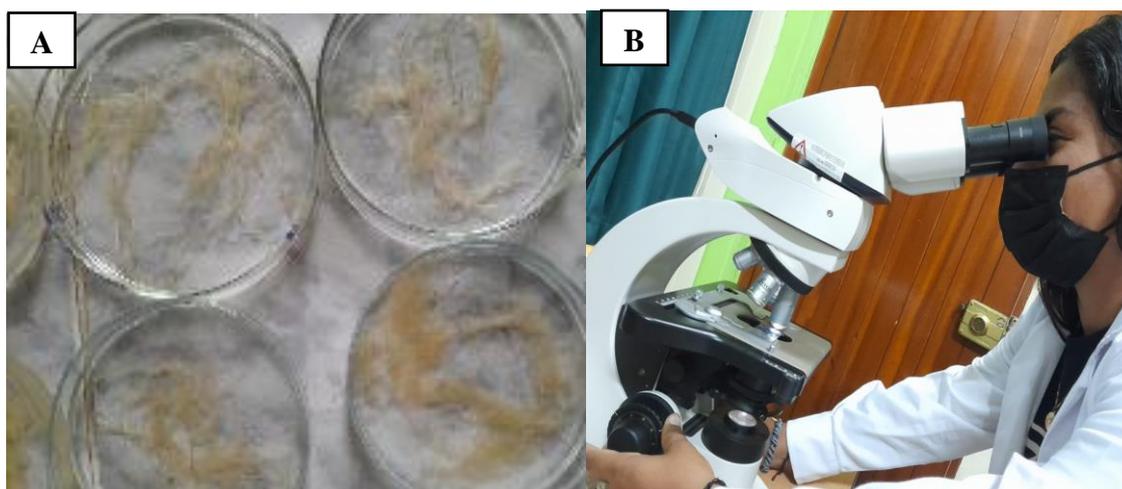
Nota: Lámina con 20 segmentos de raíces: x=Ausencia; ✓=Presencia

Para sacar el valor numérico de la colonización de micorrizas en las raíces trampa se llevó a cabo la fórmula propuesta por Sieverding, (1983) (ver Apéndice 1).

$$\% \text{ Colonización micorrízica} = \frac{\text{Nº de segmentos colonizados}}{\text{Nº total de segmentos evaluados}} \times 100$$

**Figura 5**

*Preparación de las raíces teñidas de arroz para la colonización micorrízica*



Nota. (A) Raicillas de arroz lavadas y (B) Observación de la micorrización en raíces de arroz lavadas y teñidas.

### 2.3.4. Medición de cadmio

Las plantas de arroz se extrajeron de cada macetero y por cada tratamiento, con la finalidad de realizar los análisis de concentración de cadmio (Figura 6). De cada planta se extrajeron raíces y tallos de acuerdo con de Vallejos-Torres *et al.* (2022) que consistió en cortar la planta al ras del suelo con una tijera de podar previamente desinfectada. El sistema radicular por planta se depositó en sobres manila previamente lavados; asimismo, los tallos conteniendo las hojas del arroz también fueron depositados en sobres, posteriormente se codificó y etiquetó con el tratamiento respectivo. Finalmente se precisó el contenido de

cadmio en raíces y tallos por (Digestión  $\text{HNO}_3$ ) espectrofotometría de absorción atómica (Zhang *et al.*, 2020) (ver Apéndice 1 ).

### Figura 6

*Muestreo de raíces y brotes de arroz para determinación del cadmio*



*Nota.* (A) Extracción de pan de tierra y plantas de arroz y (B) Muestreo de partes vegetativas de plantas de arroz.

#### 2.3.5. Caracterización de suelos por cada tratamiento en estudio

El estudio implicó el uso de cuatro análisis de caracterización físico químico de suelos; considerando uno por cada tratamiento estudiado. Las muestras de suelo tomadas fueron colectadas utilizando una paleta mediana introducido en forma de “V” (Figura 7A), por consiguiente, se llevó a cabo la uniformización mezclando 1 kg de suelo, las cuales fueron colocadas en envases plastificadas visible y rotuladas. El muestreo de suelo se ejecutó por maceta quitando todo las raíces y otros restos distintos al suelo con la ayuda de la mano y una paleta de mano hasta obtener una muestra compuesta para cada tratamiento (Figura 7B).

## Figura 7

### Muestreo de suelo para caracterización física química



Nota. (A), Extracción de suelo de plantas desarrolladas en los maceteros y (B), Separación del suelo y el sistema radicular de plantas de arroz.

## 2.4. Tratamientos

El presente trabajo estuvo conformado por cuatro tratamientos, dos factores (hongos micorrízicos arbusculares y contenido de cadmio) y dos niveles en estudio para cada factor y que fueron evaluadas en un periodo de 90 días, tal como se detalla en la Tabla 1.

**Tabla 1**

*Descripción de los tratamientos en estudio*

<b>Tratamiento</b>	<b>Hongos micorrízicos arbusculares (HMA)/1500 esporas/maceta</b>	<b>Cadmio (mg.kg<sup>-1</sup>)</b>
Tratamiento 1	Sin HMA	0
Tratamiento 2	Sin HMA	5
Tratamiento 3	Con HMA	0
Tratamiento 4	Con HMA	5

Nota. Elaboración propia a partir de Vallejos-Torres *et al.* (2022). El efecto combinado de hongos micorrízicos arbusculares y compost mejora el crecimiento y los parámetros del suelo y disminuye la absorción de cadmio en plantas de cacao (*Theobroma cacao* L.). <https://doi.org/10.1007/s42729-022-00992-9>

## **2.5.Unidades experimentales**

El presente estudio estuvo conformado por tres repeticiones y cuatro tratamientos en estudio, con un total de 12 UE. Cada UE fue conformado por un macetero conteniendo una mezcla de sustratos en base a arena media y suelo agrícola recogido en campo en una proporción de 1:3.

## **2.6. Identificación de las variables y su mensuración**

Para el desarrollo de este trabajo de investigación se planteó las siguientes variables de estudio con su respectiva mensuración que se muestran en la Tabla 2.

### **a. Variables Independiente**

- Hongos micorrízicos arbusculares
  - a<sub>1</sub>: Sin aplicación de HMA
  - a<sub>2</sub>: Con aplicación de HMA

### **b. Variables Dependiente**

- Concentración de cadmio
  - b<sub>1</sub>: 0 mg.kg<sup>-1</sup>
  - b<sub>2</sub>: 5 mg.kg<sup>-1</sup>

**Tabla 2***Identificación de Variables y su mensuración*

<b>Objetivo</b>	<b>Variable</b>	<b>Dimensión</b>	<b>Medio de registro</b>	<b>Unidad de medida</b>
Evaluar el efecto de los HMA en la biorremediación de cadmio en suelos, raíces y tallos con arroz ( <i>Oryza sativa</i> ) en invernadero.	Cadmio	Suelos de plantas de arroz	Método de EPA 3050B.	mg.kg <sup>-1</sup>
	Cadmio	Raíces	Método de EPA 3050B.	mg.kg <sup>-1</sup>
	Cadmio	Tallos de plantas de arroz	Digestión: HNO <sub>3</sub> /espectr. Absorción Atómica	mg.kg <sup>-1</sup>
<b>Objetivo</b>	<b>Variable</b>	<b>Dimensión</b>	<b>Medio de registro</b>	<b>Unidad de medida</b>
Determinar la correlación entre la colonización micorrízica y los contenidos de cadmio en suelos, raíces y tallos de arroz en invernadero.	Colonización micorrízica	Suelo rizosférico de arroz	Metodología desarrollada por Brundrett <i>et al.</i> (1996).	%

## 2.7. Diseño estadístico del experimento

El estudio empleó un diseño experimental completamente aleatorizado (DCA) con estructura de dos factores: 2A (Contenido de hongos) x 2B (Niveles de Cd), con un total de cuatro tratamientos y cada una de estas estuvo conformada por tres repeticiones.

## 2.8. Análisis estadísticos de datos

Se utilizó un Diseño Completamente al Azar (DCA) con arreglo factorial 2 X 2, donde el factor “A” fue la inoculación micorrízica (con y sin inoculación) y el factor “B” fue la adición de Cd a las plantas de 0 y 5mg.kg<sup>-1</sup>. Teniendo 4 tratamientos y 3 repeticiones por cada uno, siendo cada repetición una unidad experimental (plántulas de arroz), resultando

un total de 12 unidades. Se realizó el análisis de normalidad de datos y homogeneidad de varianzas mediante las pruebas de Shapiro-Wilk o Kolmogorov-Smirnov (normalidad) y Test de Levene (homogeneidad), esto con el fin de corroborar que línea de análisis seguir: estadística paramétrica o no paramétrica; para fines de la presente investigación, se aplicó transformación de datos a los indicadores: cadmio en raíz (ppm), cadmio en brote (ppm) y colonización (%), todo esto por no cumplir con los supuestos de normalidad de datos y homogeneidad de varianzas (solo en el indicador pH no se aplicó transformación), y así se siguió los lineamientos de una estadística paramétrica (utilizada para datos del tipo experimental). Luego se realizó el análisis de varianza (ANOVA) para evaluar la significancia o no de las variables en estudio, usando prueba post-hoc de Tukey al 5%. El programa usado para la estadística fue InfoStat (version 2012e; Córdoba, Argentina) (Di Rienzo *et al.* 2019) (ver Apéndice 3, 4, 5, 6 y 7).

## 2.9. Materiales y equipos

### **Campo y vivero**

- Mandil guardapolvo
- Espátula y tijera de podar
- Etiquetas amarillas y blancas
- Bolsas de cristal
- Balanza gramera
- Lapicero Indeleble
- Tabla de registro y etiquetas de plástico
- cuaderno de apuntes
- Mascara de protección
- Sustratos (arena y tierra agrícola)
- Maceteros de 3 kg

### **Laboratorio**

- Tinta Parker
- Tamices de 38 y 250 micras
- Placas Petri
- Vinagre blanco
- ácido acético
- Centrifuga de 5000 Rev. y tubos falcón
- Pissetas y micropipetas
- Baño María
- Microscopio óptico y estéreo
- microscopio
- Cloruro de cadmio

## CAPÍTULO III: RESULTADOS

### 3.1. Efecto de la colonización por HMA en suelos con y sin presencia de cadmio en cultivos de arroz en San Martín

Los valores promedio de colonización micorrízica se presentan en la Tabla 3

**Tabla 3**

*Colonización micorrízica obtenida por tratamientos*

Tratamientos	Repeticiones	Colonización (%)
Tratamiento 1	P1	0
	P2	0
	P3	0
Tratamiento 2	P1	0
	P2	0
	P3	0
Tratamiento 3	P1	88,33
	P2	81,67
	P3	85
Tratamiento 4	P1	13,33
	P2	10
	P3	15

#### 3.1.1. Análisis de varianza para la colonización micorrízica

El análisis de varianza (Tabla 4) para la colonización micorrízica (%) en los tratamientos en estudio, indica que existen altas diferencias en todos los tratamientos y la interacción de los dos factores. De modo que la colonización micorrízica influyó grandemente en los cuatro tratamientos indicados. Como resultado se correlacionó ( $R^2$ ) de 100,00 %, con un coeficiente

de variabilidad (CV) de 6,35 %. El tratamiento 3 (Inoculación con HMA sin aplicación de Cd) mostró 85 % de colonización micorrízica; en tanto, el tratamiento 4 (Inoculación con HMA con aplicación de 5 mg.kg<sup>-1</sup>) obtuvo 12,78 % de colonización; mientras que el tratamiento 1 y 2 no presentaron colonización alguna (Ver Apéndice 3). Datos transformados a función Raíz Cuadrada por no cumplir el supuesto de normalidad de datos.

**Tabla 4**

*ANOVA para la colonización micorrízica (%) en relación con los factores A: HMA y B: cadmio*

<b>Fuente de variación</b>	<b>gl</b>	<b>SC</b>	<b>CM</b>	<b>F</b>	<b>p-valor</b>
Modelo	3	170,5	56,83	1379,12	<0,0001
Inóculo de HMA	1	122,51	122,51	2972,79	<0,0001
Cd (ppm)	1	24	24	528,28	<0,0001
Inóculo de micorriza+Cd	1	24	24	582,28	<0,0001
Error	8	0,33	0,04		
Total	11	170,82			

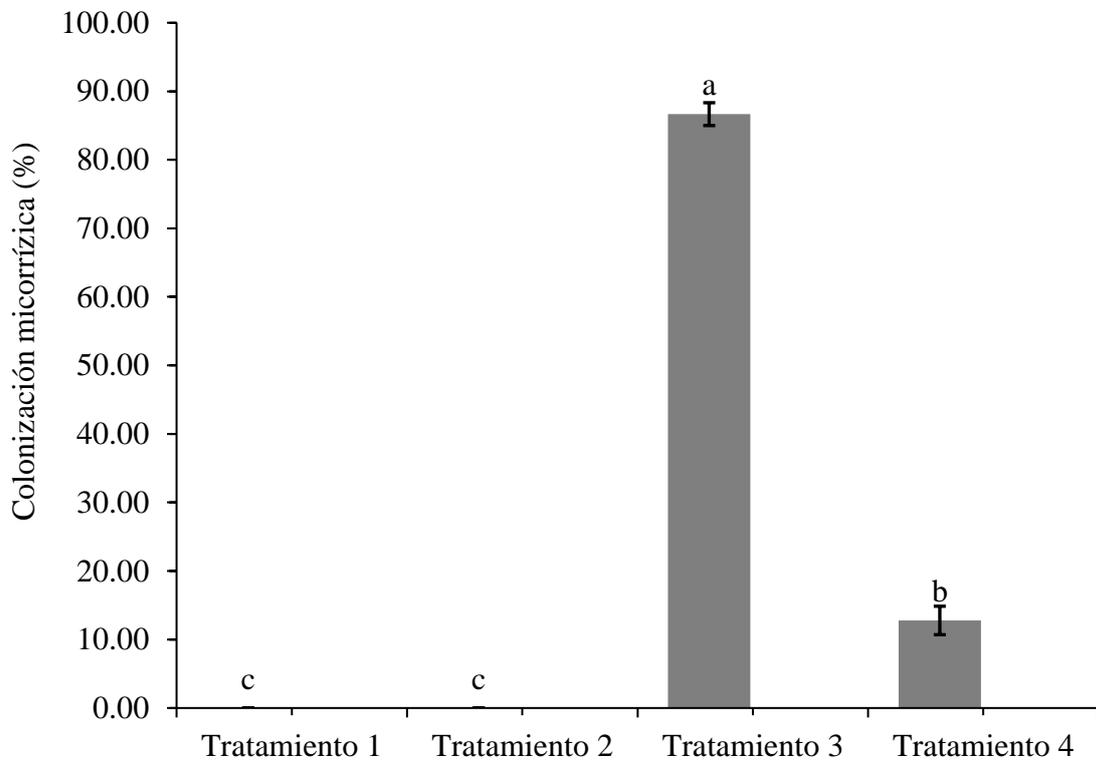
*Nota.* Valores obtenidos de la colonización micorrízica con relación a los factores de HMA y cadmio. R<sup>2</sup> = 100,00 % CV = 6,35 %

### **3.1.2. Prueba de Tukey para la colonización micorrízica**

El dominio micorrízico se elevó cuando se agregó HMA a los vegetales, con un 85 % (tratamiento 3). En relación al tratamiento mezclado entre micorrizas y Cd (tratamiento 4) obtuvo un 12,78 %, presentando diferencias significativas (p<0,05), entre ambos tratamientos (Figura 8), mientras que el tratamiento 1 y 2 no fue evidenciado diferencias significativas entre ellas (p>0,05).

### Figura 8

*Efecto de la colonización por hongos micorrízicos arbusculares en suelos con y sin presencia de cadmio en cultivos de arroz en San Martín*



*Nota.* Colonización micorrízica con un porcentaje significativo en el tratamiento 3 y 4.

### 3.2. Efecto de los HMA en la biorremediación de cadmio en el sistema radicular y tallos de plantas de “arroz” *Oryza sativa* en San Martín

Los valores promedio de Cd en raíces de plantas de “arroz” se presentan en la Tabla 5

**Tabla 5**

*Promedios del contenido de cadmio en raíces de O. sativa.*

Tratamientos	Repeticiones	Cadmio en Raíz (ppm)
Tratamiento 1	P1	0
	P2	0
	P3	0
Tratamiento 2	P1	10,66
	P2	10,69
	P3	10,68
Tratamiento 3	P1	0
	P2	0
	P3	0
Tratamiento 4	P1	7,35
	P2	9,3
	P3	8,33

El ANOVA (Tabla 6) para el cadmio en raíces ( $\text{mg.kg}^{-1}$ ) en los cuatro tratamientos, muestra que hay evidencias significativas entre tratamientos y su interacción. De modo que el contenido de Cd (cadmio) en raíces se vio influenciada grandemente por los tratamientos indicados. Se obtuvo una correlación de ( $R^2$ ) de 100,00 % y un coeficiente de variabilidad de (CV) de 5,51 %. Datos transformados a función Raíz Cuadrada por no cumplir el supuesto de normalidad de datos.

**Tabla 6**

ANOVA para cadmio en raíz ( $\text{mg.kg}^{-1}$ ) en relación con los factores A: HMA y B: cadmio

Fuente de variación	gl	SC	CM	F	p-valor
Modelo	3	28,59	9,53	1329,84	<0,0001
Inóculo de HMA	1	0,11	0,11	15,53	0,0043
Cadmio (ppm)	1	28,37	28,37	3958,46	<0,0001
Inóculo de micorriza+Cd	1	0,11	0,11	15,53	0,0043
Error	8	0,06	0,01		
Total	11	28,64			

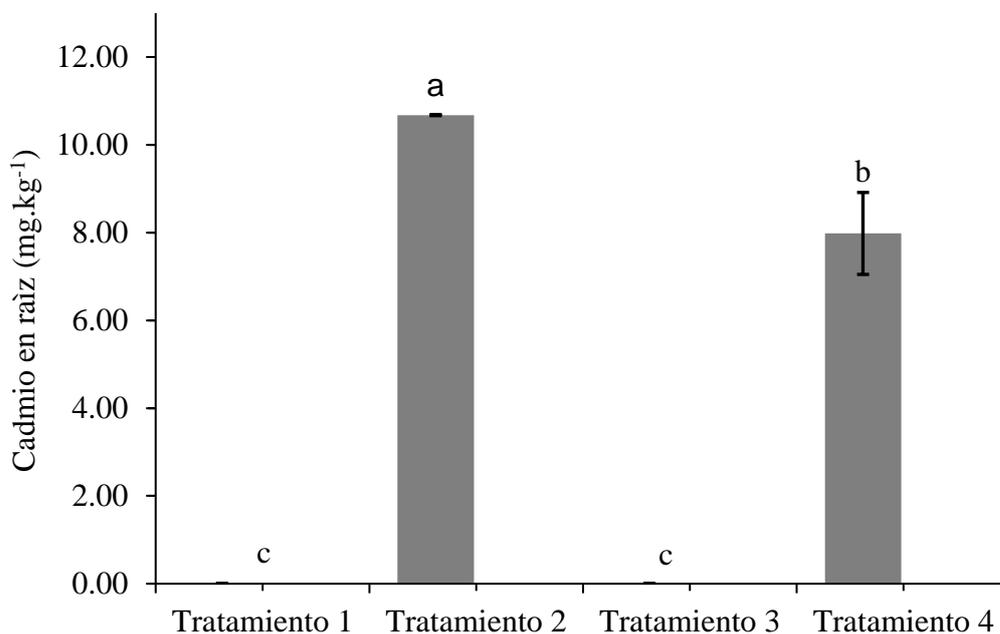
Nota. Valores obtenidos en el ANOVA del cadmio en la raíz, con relación a los factores de HMA y cadmio.  
 $R^2 = 100,00\%$   $CV = 5,51\%$

### 3.2.2. Prueba de Tukey el cadmio en raíces

Los valores de Cd (cadmio) en raíces fue mayor en los tratamientos con Cd, con promedio de  $10,68 \text{ mg.kg}^{-1}$  (tratamiento 2); sin embargo, cuando se adicionó micorrizas al tratamiento con cadmio (tratamiento 4) disminuyó hasta llegar a  $8,33 \text{ mg.kg}^{-1}$  (Figura 9). Asimismo, los resultados son significativas entre el tratamiento 2 (sin HMA, con  $5 \text{ mg.kg}^{-1}$  de Cd) y el tratamiento 4 (con HMA, con  $5 \text{ mg.kg}^{-1}$  de Cd). Mientras que el tratamiento 1 y tratamiento 3 que no recibieron Cd no mostraron contaminación por este metal (Ver Apéndice 4).

**Figura 9**

*Influencia de HMA, compost y Cd en raíces*



*Nota.* La concentración de cadmio en la raíz es mayor en el tratamiento 2 debido a la influencia de HMA, y Cd en raíces.

### **3.3. Cadmio en tallos (mg.kg<sup>-1</sup>) en relación con los factores HMA y cadmio en plantones de arroz**

Los valores promedio del contenido de cadmio en brotes de *O. sativa* se presentan en la tabla 7.

**Tabla 7**

*Promedios del contenido de cadmio en brotes de O. sativa*

Tratamientos	Repeticiones	Cadmio en brotes (ppm)
Tratamiento 1	P1	0
	P2	0
	P3	0
Tratamiento 2	P1	1,94
	P2	1,73
	P3	1,84
Tratamiento 3	P1	0
	P2	0
	P3	0
Tratamiento 4	P1	1,73
	P2	1,56
	P3	1,65

### 3.3.1. Análisis de varianza para el cadmio en brotes

El ANOVA del Cd (cadmio) en brotes ( $\text{mg.kg}^{-1}$ ) en los 4 tratamientos (Tabla 8), son significativas entre ellos. Por lo tanto, asumimos que la colonización micorrízica se ve afectado significativamente con la adición de HMA, Cd y la interacción entre ambos tratamientos. Se obtuvo un coeficiente de correlación ( $R^2$ ) de 100,00 % y un CV de 3,87 %. Datos transformados a función Raíz Cuadrada por no cumplir el supuesto de normalidad de datos.

**Tabla 8**

*ANOVA para el cadmio en brotes ( $\text{mg.kg}^{-1}$ ) en relación con los factores A: HMA y B: cadmio*

Fuente de variación	gl	SC	CM	F	p-valor
Modelo	3	5,23	1,74	2674,14	<0,0001
Inóculo de HMA	1	3,90E-03	3,90E-03	5,96	0,0405
Cadmio (ppm)	1	5,22	5,22	8010,51	<0,0001
Inóculo de micorriza+Cd	1	3,90E-03	3,90E-03	5,96	0,0405
Error	0,01	8	6,50E-04		
Total	11	5,23			

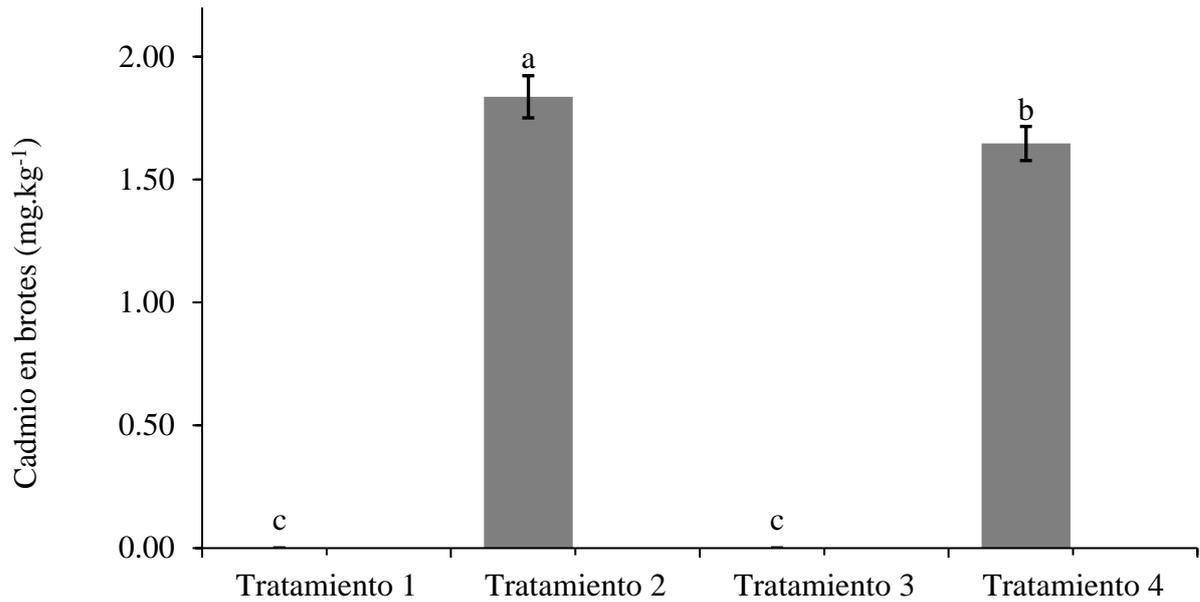
*Nota.* Valores obtenidos en el ANOVA del cadmio en tallo con relación al factor de HMA y cadmio.  $R^2 = 100,00\%$  CV = 3,87 %

### 3.3.2. Prueba de Tukey para el cadmio en brotes de arroz

Los valores de Cd en brotes fueron mayores en los tratamientos que recibieron Cd, con  $1,84 \text{ mg.kg}^{-1}$  en el tratamiento 2; sin embargo, cuando se aplicó los HMA el cadmio se redujo a  $1,65 \text{ mg.kg}^{-1}$  (tratamiento 4). Los tratamientos 1 y 3 que no recibieron cadmio no mostraron concentración alguna de este metal en los brotes del arroz (Figura 10). De acuerdo a la Figura 10, se observa diferencias entre el grupo que obtuvo Cd y el que no obtuvo Cd. Incluso se puede notar que los tratamientos 2 y 4 son significativos.

**Figura 10**

*Influencia de HMA, compost y Cd en el Cd en brotes*



*Nota.* La concentración de cadmio en el brote es mayor en el tratamiento 2 porque tiene influencia de la inoculación de Cd.

### **3.4. Potencial de Hidrógeno (pH) del suelo en relación con los HMA y cadmio en plantones de arroz**

Los valores promedio del potencial de hidrogeno(pH) se presentan en la tabla 9.

**Tabla 9**

*Promedios del potencial de hidrógeno(pH) en suelos contaminados con Cd*

Tratamientos	Repeticiones	Potencial de hidrogeno(pH)
Tratamiento 1	P1	6,52
	P2	5,8
	P3	6,16
Tratamiento 2	P1	7,19
	P2	7,01
	P3	7,1
Tratamiento 3	P1	7,46
	P2	7,41
	P3	7,435
Tratamiento 4	P1	7,39
	P2	7,45
	P3	7,42

### 3.4.1. Análisis de varianza para el potencial de hidrógeno (pH)

El ANOVA (Tabla 10) para el potencial de hidrógeno en los cuatro tratamientos indica la existencia evidencias significativas solo usando los hongos micorrízicos arbusculares, de modo que la longitud de micelio extraradical es afectado grandemente con la inoculación de HMA. Se obtuvo un coeficiente de correlación ( $R^2$ ) de 92 % y un coeficiente de variación (CV) de 2,65 %. En este caso no se transformaron datos porque si se cumplió con la normalidad.

**Tabla 10**

*ANOVA para el potencial de hidrogeno con los factores: Factor A: HMA y factor B: cadmio*

<b>Fuente de variación</b>	<b>gl</b>	<b>SC</b>	<b>CM</b>	<b>F</b>	<b>p-valor</b>
Modelo	3	3,23	1,08	30,97	0,0001
Inóculo de HMA	1	1,91	1,91	54,82	0,001
Cadmio (ppm)	1	0,64	0,64	18,44	0,0026
Inóculo de micorriza+Cd	1	0,68	0,68	19,65	0,0022
Error	8	0,28	0,03		
Total	11	3,51			

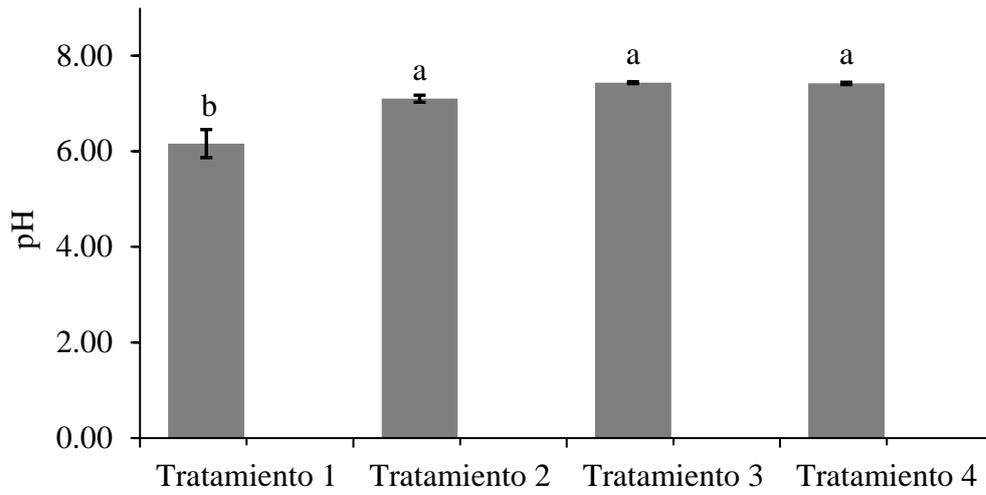
*Nota.* Valores de cada fuente de variación obtenidos en el ANOVA, con relación a los HMA y cadmio.  
 $R^2 = 92,00$  % CV = 2,65 %

### 3.4.2. Prueba de Tukey para el Potencial de hidrógeno (pH) del suelo

Solo hubo significancia en el tratamiento 1 (Sin HMA y sin Cd), los demás tratamientos no tuvieron significancia, estos fueron quienes recibieron la aplicación de micorrizas arbusculares (tratamiento 3 y tratamiento 4) (Figura 11); sin embargo, los tratamientos que no recibieron micorrizas arbusculares (tratamiento 1 y tratamiento 2) mostraron los menores promedios de pH. El tratamiento 3 presentó el mayor valor en pH; pues este tratamiento recibió HMA sin concentración alguna de cadmio con promedio de 7,44.

**Figura 11**

*Influencia HMA y cloruro en el potencial de hidrogeno de suelos en Oryza sativa*



*Nota.* Variaciones del potencial de hidrogeno en suelos con HMA y Cd en plantas de *Oryza sativa*

## CAPÍTULO IV: DISCUSIÓN

### 4.1. Colonización micorrízica (%) en relación con el cadmio en plántones de “arroz”

#### 4.1.1. Análisis de varianza para la colonización micorrízica

Los resultados mostrados en la colonización micorrízica en relación con el cadmio en plántones de arroz evidencian que el tratamiento que tuvo Cd (tratamiento 4) redujo significativamente el porcentaje de colonización comparado con el tratamiento que no recibió Cd (tratamiento 3), mostrando diferencias significativas entre ambos tratamientos. Los tratamientos que no recibieron aplicación de esporas de HMA (tratamientos 1 y 2) no mostraron presencia de colonización micorrízica.

Esta información es corroborada por Hui *et al.* (2022) donde indica que los HMA simbiotes obligados de las plantas pueden reducir las concentraciones de Cd en el arroz, asimismo, Wu *et al.* (2015) indican que los HMA pueden participar en los procesos de acumulación de Cd, como la disminución de la fitodisponibilidad de los metales al inmovilizarlos mediante hifas. Asimismo, Pérez *et al.* (2019) registraron una colonización micorrízica de hasta un 60 % en ensayos con plantas de cacao con aplicación de Cd, resultados similares a este trabajo; mientras que Luis-Ayala *et al.* (2023) encontraron que la colonización total de micorrizas de cacao en las tres plantaciones tuvo valores estadísticamente similares (68–86 %).

En suelos cacaoteros Sandoval-Pineda *et al.* (2020) reportó baja diversidad de HMA comparado con suelos con bajos niveles de Cd. Los altos niveles de contaminación por Cd tienden a afectar de forma negativa la germinación de esporas de HMA y la colonización de micorrizas Chan *et al.* (2013).

Los contaminantes suprimen el crecimiento y desarrollo de las raíces y la colonización de HMA (Riaz *et al.*, 2021). Las altas concentraciones y disponibilidad de Cd empleado en el estudio generaron un estrés continuo en la comunidad de HMA, afectando la colonización micorrízica en el tratamiento 4 (5 mg.kg<sup>-1</sup>).

Los resultados logrados en el presente trabajo concuerdan con el estudio de Pérez *et al.* (2019), quien demostró que plantas de cacao inoculadas y colonizadas con micorrizas arbusculares nativos, redujeron significativamente el contenido de Cd en todos los órganos evaluados; asimismo, resultados similares obtuvieron Liu *et al.* (2014) en maíz bajo condiciones de invernadero, observando que después de nueve semanas, estos porcentajes de colonización disminuyeron para los tratamientos inoculados con HMA.

De acuerdo con nuestros resultados, una manera eficiente de controlar el cadmio es mediante la colonización micorrízica del sistema radicular del cultivo de “arroz” y evitar que este ingrese a los granos; evidenciando así el potencial de esta asociación de HMA para la biorremediación y fomento del desarrollo de cultivos (Molina *et al.*, 2020).

## **4.2. Cadmio en raíces (mg.kg<sup>-1</sup>) en relación con los factores HMA y cadmio en plántones de arroz**

### **4.2.1. Análisis de varianza para el cadmio en raíces**

Los resultados del Cd en raíces en relación con los factores HMA y cadmio en plántones de arroz muestran diferencias significativas en todos los tratamientos y las combinaciones entre ellos; asimismo, se muestra que existe mayor concentración de cadmio (10,68 y mg.kg<sup>-1</sup>) en el tratamiento sin aplicación de HMA (tratamiento 2), mientras que existe menor concentración de Cd en el tratamiento que recibió aplicación de HMA, encontrándose una concentración promedio de 8,33 mg.kg<sup>-1</sup> (tratamiento 4).

Los resultados mostrados concuerdan con algunos autores donde mencionan que la parte de la raíz de la planta está que está en contacto directo con el suelo contaminado con Cd, genera un daño más significativo, exhibiendo un aumento del color de la raíz, agrandamiento del tejido local o incluso descomposición, debido a un estrés generado por el Cd (Hembrom, *et al.*, 2020 y Hasan *et al.*, 2007). Los mayores valores de cadmio ( $10,68 \text{ mg.kg}^{-1}$ ) encontrado en las raíces sin aplicación de HMA (tratamiento 2) mientras se redujo considerablemente con aplicación de micorrizas arbusculares ( $8,33 \text{ mg.kg}^{-1}$ ). Este estudio concuerda con Yu *et al.* (2022) demostrando que la inoculación de HMA juega un papel importante en la reducción de la lixiviación de Cd. La raíz del cultivo es la parte de la planta que entra en contacto directo con el suelo y es el principal órgano de absorción de la planta, y su desarrollo está frecuentemente influenciado por la toxicidad del Cd (Liu y Wei, 2019).

Asimismo, los resultados mostraron que las interacciones entre las etapas de crecimiento del arroz, las concentraciones de Cd en el suelo y la inoculación de micorrizas tuvieron efectos significativos (Luo *et al.*, 2017). Es decir, en suelos contaminados con Cd, los HMA redujo las concentraciones de Cd en suelo con  $2 \text{ mg de Cd.kg}^{-1}$  disminuyendo hasta en 46 % en la etapa de macollamiento de arroz; en tanto, los HMA y las raíces de maíz redujeron las concentraciones de Cd en el flujo intermedio en los suelos contaminados de  $6,9 \pm 0,6$  a  $4,8 \pm 0,7 \text{ ug. g}^{-1}$  (He *et al.*, 2020); por lo tanto, los HMA desempeñan un papel importante en la tolerancia de las plantas en suelos contaminados con Cd (Cruz-Paredes *et al.*, 2017).

### **4.3. Cadmio en tallos ( $\text{mg.kg}^{-1}$ ) en relación con los factores HMA y cadmio en plántones de arroz**

#### **4.3.1. Análisis de varianza para el cadmio en tallos**

Según los resultados sobre el Cd en tallos, hay diferencias significativas en todos los tratamientos, en donde el contenido el contenido de Cd en aquellos tratamientos que recibió Cd, obteniendo un contenido de  $1,84 \text{ mg.kg}^{-1}$  en el tratamiento 2. Mientras que al aplicar el HMA, el volumen de cadmio se redujo, bajando a  $1,65 \text{ mg.kg}^{-1}$  (tratamiento 4). En tanto, aquellos tratamientos que no recibieron cadmio (tratamiento 1 y tratamiento 3)

no mostraron concentración de cadmio; existiendo diferencias significativas entre ambos tratamientos.

Estos resultados son congruentes con lo obtenido por Zhang *et al.* (2015) quienes encontraron que el Cd en tallos fue de 8 mg.kg<sup>-1</sup> cuando aplicaron 5 mg.kg<sup>-1</sup> de Cd; mientras que cuando no aplicaron cadmio el valor estuvo por debajo de 0,5 mg.kg<sup>-1</sup> de Cd con aplicación de HMA. La reducción de Cd con la inoculación de hongos micorrícicos en los tallos de plantas de cacao es debido al aumento de la retención del metal dentro de las raíces (Wang *et al.*, 2020).

En tanto, estos resultados son corroborados por Chen *et al.* (2022) quienes demostraron que los HMA afectan la absorción de Cd. Asimismo, encontró que los HMA en suelos agrícolas redujeron significativamente las concentraciones de Cd en los brotes entre 5,6 a 39,2 %. En tanto, los HMA reducen el contenido de Cd en las plantas (Fengge *et al.*, 2019).

Se demostró que los HMA disminuyen el contenido de Cd mejorando su desarrollo morfológico, lo que puede provocar la dilución de metales en la planta huésped (Redon *et al.*, 2008). Por otro lado, numerosos estudios han indicado que los efectos positivos de los HMA en plantas bajo estrés por metales pesados podrían atribuirse, directa o indirectamente, a mejoras en la asimilación de nutrientes minerales, especialmente de P, por parte de las plantas (Liu *et al.*, 2017; Luo *et al.*, 2017; Kanu *et al.*, 2017 y Vallejos-Torres *et al.*, 2022). Esto podría deberse a la formación de una extensa red de hifas extrarradical que permite una mayor captación de P (Chandrasekaran *et al.*, 2014). Por lo tanto, nuestros resultados corroboran los efectos beneficiosos de los HMA al inmovilizar el Cd en el sistema radicular y evitando que este metal ingrese a la planta.

#### **4.4. Potencial de hidrógeno (pH) del suelo en relación con los HMA y cadmio en plántones de arroz**

##### **4.4.1. Análisis de varianza para el Potencial de hidrógeno(pH)**

En este estudio la aplicación de HMA incrementó el pH del suelo mostrando diferencias significativas con los tratamientos que no recibieron aplicación de HMA. En tanto así que el tratamiento 3 que recibió HMA sin concentración alguna de cadmio presentó el mayor valor de pH. Nuestro estudio mostro una leve variación del potencial de Hidrógeno de 6,16 a 7,44 sin y con aplicación de HMA respectivamente. El potencial de hidrógeno(pH) del suelo no afecta los HMA; estos microorganismos dependen más de la comunidad vegetal huésped (plantas de arroz) que de las propiedades fisicoquímicas del suelo (Krüger *et al.*, 2017). Sin embargo, se conoce que los HMA podrían elevar el potencial de hidrógeno(pH) del suelo (Hu *et al.*, 2014). El aumento del pH del suelo podría haber causado una disminución en la disponibilidad de metales pesados (Shen *et al.*, 2006). Asimismo, Hu *et al.* (2019) encontraron que la inoculación con HMA y enmiendas en ambientes contaminados con Cd provocó un aumento del pH en suelos con sembríos de maíz de 5,3 a alrededor de 7,5. El incremento del potencial de hidrógeno(pH) en este estudio estuvo en el rango ácido (4,4 a 6,3); resultados similares a lo encontrado por Baki *et al.* (2021), quienes obtuvieron un potencial de Hidrógeno(pH) de 4,58 a 5,93 con buenas tasas de colonización micorrícica en cultivos de arroz.

Además, el arroz es una gramínea de la familia Poaceae de rápida germinación y altamente micotrófica, por lo que se emplea como planta huésped para la multiplicación de estos hongos (Sánchez de Prager, *et al.*, 2010); este aspecto facultativo, sumado al desarrollo radicular y el corto periodo vegetativo del arroz propician un mayor número de especies de HMA y por ende una mayor absorción del Cd (Vallejos-Torres *et al.*, 2022). Este resultado sugiere que la tasa de colonización de AMF en las raíces del arroz de secano podría verse afectada por la potencia de hidrógeno(pH) del suelo.

Al margen del cambio del potencial de hidrógeno(pH) leve que se observó en el estudio, el porcentaje de colonización en plantas de arroz inoculado con HMA contrarrestó el contenido de Cd. Este hallazgo sugiere que los HMA brindan protección a las plantas de arroz contra la toxicidad combinada de Cd en el suelo como lo indica Herath *et al.* (2023). Asimismo, los resultados encontrados en este estudio son muy cercanos a lo reportado por Vallejos-Torres *et al.* (2022) en plantas de *Theobroma cacao*; encontrando incrementos de pH des hasta 7,5 en comparación al tratamiento sin aplicación de HMA con un promedio de 6,6. La efectividad de los hongos micorrízicos depende del pH del suelo (Carballar-Hernández *et al.* 2017; Li *et al.* 2017). Según Lin *et al.* (2017), el desarrollo de hongos micorrízicos autóctonos puede inhibirse a los niveles de pH más altos, mientras que Parihar *et al.* (2019) demostraron que un pH alto favorece valores altos de frecuencia micorrízica.

Por lo tanto, la biodisponibilidad de Cd en el suelo aparentemente estuvo influenciada por el nivel de pH del suelo. El potencial de Hidrógeno(pH) ácido se relaciona frecuentemente con el aumento de la biodisponibilidad de Cd (Shaari *et al.*, 2023). Valores de potencial de hidrógeno(pH) más bajos dieron como resultado un aumento sustancial de la biodisponibilidad de Cd, lo que permitió la actividad de absorción de este elemento a otros tejidos vegetales (Yang *et al.*, 2016). Según lo informado por Rafiq *et al.* (2014). El ambiente ácido podría ofrecer mayores posibilidades de transformación de Cd de una forma inmóvil a una forma libremente biodisponible ( $Cd^{2+}$ ) (Li *et al.*, 2014). Como resultado, se mejora la desorción de Cd de las partículas del suelo en la solución del suelo, lo que hace que los iones  $Cd^{2+}$  estén más disponibles para la absorción por parte de las células de las raíces de las plantas (Zhai *et al.*, 2018).

## CAPÍTULO V: CONCLUSIONES

1. La colonización micorrízica fue alto debido a que se aplicaron HMA (tratamiento 3) a las plantas de “arroz”, llegando a tener una concentración promedio a 85%. Mientras que el tratamiento 4, en la que se combinó el HMA con cadmio se obtuvo una concentración de colonización micorrízica de 12,78 %, demostrando que entre los tratamientos hubo diferencias estadísticas significantes ( $p < 0,05$ ). Por lo tanto, la aplicación de micorrizas arbusculares tiene un efecto significativo en la biorremediación del cadmio en “arroz”. Asimismo, el coeficiente de determinación  $R^2$  fue 0,100, indicando que la aplicación de HMA y Cd influyen en el 100 % en la colonización micorrízica.
2. El tratamiento sin aplicación de micorrizas arbusculares mostró elevadas concentraciones de cadmio, llegando a alcanzar hasta  $10,68 \text{ mg.kg}^{-1}$ . Evidenciándose diferencias entre los tratamientos y existiendo diferencias significativas en todos los tratamientos y las combinaciones entre ellos. Asumiendo que el volumen de Cd en raíces de arroz se ve influenciada enormemente por los tratamientos indicados. El contenido de cadmio en tallos fue mayor en los tratamientos que recibieron cloruro de cadmio, obteniendo  $1,84 \text{ mg.kg}^{-1}$  en dicho tratamiento, mientras que en aquellos que no recibieron cadmio no hubo demostración de concentración alguna.
3. De todos los tratamientos mostrados en este estudio, el tratamiento con aplicación de HMA (tratamiento 4) mostró la mayor concentración de potencial de hidrógeno(pH) (7,44). Con lo cual se concluyó que, añadiendo hongos micorrízicos a suelos contaminados con cadmio muestra un impacto favorable en la concentración de pH en los vegetales.

## CAPÍTULO VI: RECOMENDACIONES

1. A los agricultores se les recomienda la aplicación de hongos micorrizas arbusculares (HMA) a las plantas de arroz. Debido a que estos tienen un efecto significativo en la colonización micorrízica.
2. A los agricultores se les recomienda la no utilización del cadmio en plantas de “arroz” *Oryza sativa*. De manera que estos tienen una reacción altamente negativa en la colonización micorrízica, evidenciándose altos porcentajes de concentración de cadmio en las plantas que fueron tratados con cloruro de cadmio.
3. A los agricultores se les recomienda la aplicación de hongos micorrizas arbusculares (HMA). Debido a que este tiene un impacto significativo en la biorremediación de Cd en el sistema radicular y tallos de planta de “arroz” *Oryza sativa*.
4. A los campesinos se les recomienda la aplicación de solo hongos micorrizas arbusculares (HMA). Debido a que este influye significativamente en la longitud de micelio extraradical.
5. A los futuros profesionales se sugiere profundizar la investigación con la medición de más parámetros e indicadores, para verificar los resultados presentados.
6. A los alumnos de la facultad de Ingeniería Agraria, evaluar la viabilidad de multiplicar micorrizas y su impacto en las plantaciones de arroz para obtener mejor producción.

7. Realizar la identificación molecular de las esporas de los hongos micorrizas arbusculares propagadas, con la finalidad de entender la adaptabilidad con las raíces de las plantas de arroz.
  
8. Realizar un estudio fisicoquímico de suelo de cada tratamiento, con el propósito de evaluar la influencia de los elementos edáficos en el comportamiento de los hongos micorrizas arbusculares.

## REFERENCIAS

- Acevedo, M. A., Castrillo, W. A. y Belmonte, U. C. (2006). Origen, evolución y diversidad del arroz. *Agronomía Tropical*, 56(2), 151-170. [http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0002-192X2006000200001&lng=es&tlng=es](http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0002-192X2006000200001&lng=es&tlng=es).
- Acevedo, L., Chacon, H., Meneses, V. y Leyton A. A. (2021). Cadmium accumulation and distribution in artichoke plants (*Cynara scolymus* L.) grown in two contaminated agricultural soils. *Manglar*, 18(4), 443-447. <https://doi.org/10.17268/manglar.2021.057>.
- Alloway, B.J. (2013). Heavy Metals in Soils: Trace Metals and Metalloids in Soils and their Bioavailability. [Metales pesados en suelos: metales traza y metaloides en suelos y su biodisponibilidad]. *Heavy Metals in Soils*, 22. <https://link.springer.com/content/pdf/bfm:978-94-007-4470-7/1>.
- Argüello, D., Chavez, E., Laurysen, F., Vanderschueren, R., Smolders, E. y Montalvo, D. (2019). Soil properties and agronomic factors affecting cadmium concentrations in cacao beans: A nationwide survey in Ecuador. [Propiedades del suelo y factores agronómicos que afectan las concentraciones de cadmio en granos de cacao: una encuesta nacional en Ecuador]. *Science of The Total Environment*, 649, 120-127. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.292>.
- Agüero-Fernández, M., Hernández-Montiel, L.G., Nieto-Garibay, A., Troyo-Diéguez, E., Zulueta, R. y Murillo-Amador, B. (2016). Hongos micorrízicos arbusculares como agentes mitigadores del estrés salino por NaCl en plántulas de albahaca”, *Nova Scientia*, 8(17), 60–86, 2016. <https://doi.org/10.21640/ns.v8i17.533>
- Baki, M. Z. I., Suzuki, K., Takahashi, K., Chowdhury, S. A., Asiloglu, R. y Harada, N. (2021). Molecular genetic characterization of arbuscular mycorrhizal fungi associated with upland rice in Bangladesh. *Rhizosphere*, 18, 100357. <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2021.100357>

- Bateman, A. M., Erickson, T. E., Merritt, D. J., Veneklaas, E. J. y Muñoz-Rojas, M. (2021). Native plant diversity is a stronger driver for soil quality than inorganic amendments in semi-arid post-mining rehabilitation. [La diversidad de plantas nativas es un impulsor más fuerte para la calidad del suelo que las enmiendas inorgánicas en la rehabilitación posterior a la minería semiárida]. *Geoderma*, 394, 115001. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115001>.
- Beltrán-Pineda, M. E. y Gómez-Rodríguez, A. M. (2016). Biorremediación de metales pesados cadmio (Cd), cromo (Cr) y mercurio (Hg), mecanismos bioquímicos e ingeniería genética: una revisión. *Revista Facultad de Ciencias Básicas*, 12(2), 172-197. <https://doi.org/10.18359/rfcb.2027>.
- Bolan, N., Kunhikrishnan, A., Thangarajan, R., Kumpiene, J., Park, J., Makino, T., Kirkham, M. B. y Scheckel, K. (2014). Remediation of heavy metal contaminated soils- To mobilize or to immobilize? [Remediación de suelos contaminados con metales pesados ¿Movilizar o inmovilizar?]. *Journal of Hazardous Materials*, 266, 141-166. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.12.018>.
- Borda, B. y Lahura, N. (2021). Incidencia de los metales pesados, en la calidad de la papa negra “*Solanum Tuberosum*” proveniente de la provincia de Tarma, Junín, Perú. *Cátedra Villarreal*, 9(1). <https://doi.org/10.24039/cv2020821046>.
- Brundrett, M. C., Bougher, N., Dell, B. y Grove, T. (1996). Working with mycorrhizas in forestry and agriculture. [Trabajo con micorrizas en silvicultura y agricultura]. *Australian Centre for International Agricultural Research*. <https://doi.org/10.13140/2.1.4880.5444>.
- Chan, W. F, Li, H., Wu, F. Y., Wu, S. C., Wong, M. H. (2013) Arsenic uptake in upland rice inoculated with a combination or single arbuscular mycorrhizal fungi. [Absorción de arsénico en arroz de secano inoculado con una combinación o hongos micorrízicos arbusculares simples]. *Journal Hazard Mater.* 262, 1116–1122. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.08.020>.
- Carballar-Hernández, S., Hernández-Cuevas, L. V., Montaña, N. M., Larsen, J., Ferrera-Cerrato, R., Taboada-Gaytán, O. R. y Alarcón, A. (2017) Comunidades nativas de hongos micorrízicos arbusculares asociados a *Capsicum annuum* L. responden a las propiedades del suelo y al manejo agronómico en condiciones de campo. *Medio ambiente del ecosistema agrícola* 245, 43–51. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.05.004>.

- Chandrasekaran, M., Boughattas, S., Hu, S., Oh, S. H. y Sa, T. (2014) A meta-analysis of arbuscular mycorrhizal effects on plants grown under salt stress. [Un metanálisis de los efectos de las micorrizas arbusculares en plantas cultivadas bajo estrés salino]. *Mycorrhiza*, 24, 611. <https://doi.org/10.1007/s00572-014-0582-7>.
- Chavez, E., He, Z. L., Stoffella, P. J., Mylavarapu, R. S., Li, Y. C., Moyano, B. y Baligar, V. C. (2015). Concentration of cadmium in cacao beans and its relationship with soil cadmium in southern Ecuador. [Concentración de cadmio en granos de cacao y su relación con el cadmio del suelo en el sur de Ecuador]. *Science of The Total Environment*, 533, 205-214. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.06.106>.
- Chen, X. W., Wu, L., Luo, N., Mo, C. H., Hung, M. y Hui, Li. (2019). Arbuscular mycorrhizal fungi and the associated bacterial community influence the uptake of cadmium in rice, [Los hongos micorrízicos arbusculares y la comunidad bacteriana asociada influyen en la absorción de cadmio en el arroz]. *Geoderma*, 37, 749-757. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.10.029>.
- Chen, J., Guo, J., Li, Z., Liang, X., You, Y., Li, M., He, Y. y Zhan, F. (2022). Effects of an Arbuscular Mycorrhizal Fungus on the Growth of and Cadmium Uptake in Maize Grown on Polluted Wasteland, Farmland and Slopeland Soils in a Lead-Zinc Mining Area. [Efectos de un hongo micorrízico arbuscular sobre el crecimiento y la absorción de cadmio en maíz cultivado en suelos contaminados de tierras baldías, agrícolas y de laderas en un área minera de plomo y zinc]. *Toxics*, 10(7), 359. <https://doi.org/10.3390/toxics10070359>.
- Cruz-Paredes, C., López-García, Á., Rubæk, G. H, Hovmand, M. F., Sørensen, P. y Kjøller, R. (2017). Risk assessment of replacing conventional P fertilizers with biomass ash: Residual effects on plant yield, nutri-tion, cadmium accumulation and mycorrhizal status. [Evaluación de riesgos de reemplazar los fertilizantes fosforados convencionales con cenizas de biomasa: efectos residuales en el rendimiento de las plantas, la nutrición, la acumulación de cadmio y el estado de las micorrizas]. *Science Total Environment*, 575, 1168–1176. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.194>.
- Cucufate, P. A. (2017). *Cuantificación de la ingesta de cadmio a través del consumo de Oryza Sativa L. (arroz pulido) comercial cocido por los habitantes de Lima moderna 2015* [(Tesis de posgrado). Universidad San Ignacio de Loyola, Lima]. <https://repositorio.usil.edu.pe/items/a1db5ac2-fbb6-4087-909f-a129a37b1bf1>.
- Cui, X., Fang, S., Yao, Y., Li, T., Ni, Q., Yang, X. y He, Z. (2016). Potential mechanisms of cadmium removal from aqueous solution by Canna indica derived biochar. [Mecanismos potenciales de eliminación de cadmio de la solución acuosa por biocarbón derivado de Canna indica]. *Science of the Total Environment*, 562, 517-525. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.03.248>.

- Dalcorso, G., Fasani, E. y Furini, A. (2013). Recent advances in the analysis of metal hyperaccumulation and hypertolerance in plants using proteomics. [Avances recientes en el análisis de hiperacumulación e hipertolerancia de metales en plantas usando proteómica]. *Frontiers Plant Science* 4(280). <https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00280>.
- Del Águila, K. M., Vallejos-Torres, G., Arévalo, L. A. y Becerra, A. G. (2018). Inoculación de Consorcios Micorrícicos Arbusculares en *Coffea arabica* L., Variedad Caturra en la Región San Martín. *Información Tecnológica*, 29(1), 137-146. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642018000100137>.
- Deng, X., Chen, Y., Yang, Y., Lu, L., Yuan, X., Zeng, H., yZeng, Q. (2020). Cadmium accumulation in rice (*Oryza sativa* L.) alleviated by basal alkaline fertilizers followed by topdressing of manganese fertilizer. *Environmental Pollution*, 262, 114289. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114289>
- Fengge, Z., Moha, L., Yang, L. Yeyey, C. y Yan. X. (2019). Effects of arbuscular mycorrhizal fungi, biochar and cadmium on the yield and element uptake of *Medicago sativa*. [Efectos de hongos micorrízicos arbusculares, biocarbón y cadmio sobre el rendimiento y la absorción de elementos de *Medicago sativa*]. *Science of the Total Environment*. 655, 1150-1158. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.317>.
- González-Chávez, M., Ortega-Larrocea, M., Carrillo-González, R., López-Meyer, M., Xoconostle-Cázares, B., Gomez, S. K., Harrison, M. J., Figueroa-López, A. M. y Maldonado-Mendoza, I. E. (2011). Arsenate induces the expression of fungal genes involved in As transport in arbuscular mycorrhiza. [El arseniato induce la expresión de genes fúngicos implicados en el transporte de As en micorrizas arbusculares]. *Fungal Biology*, 115(12), 1197-1209. <https://doi.org/10.1016/j.funbio.2011.08.005>.
- González, F. J. (1982). *Beneficios y futuro de la investigación de arroz en Colombia*. *Arroz. Colombia*, 31(316), 8-13. <https://hdl.handle.net/10568/88495>.
- Grant, C. A., Clarke, J. M., Duguid, S. y Chaney, R. L. (2008). Selection and breeding of plant cultivars to minimize cadmium accumulation. [Selección y mejoramiento de cultivares de plantas para minimizar la acumulación de cadmio]. *Science of The Total Environment*, 390(2-3), 301-310. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.10.038>.
- Hasan, S., Alí, B., Hayat, S. y Ahmad, A. (2007). Cambios inducidos por cadmio en el crecimiento y la actividad de la anhidrasa carbónica del garbanzo. *Revista Turca de biología*, 31(2), 137-140. <https://journals.tubitak.gov.tr/biology/vol31/iss3/2/>

- He, Y. M., Yang, R., Lei, G., Li, B., Jiang, M., Yan, K., Zu, Y. Q., Zhan, F. D. y Li, Y. (2020). Arbuscular mycorrhizal fungi reduce cadmium leaching from polluted soils under simulated heavy rainfall. [Los hongos micorrízicos arbusculares reducen la lixiviación de cadmio de suelos contaminados bajo fuertes lluvias simuladas]. *Environ Pollut*, 263(Pt B), 114406. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114406>.
- Hembrom, S., Singh, B., Gupta, S. y Nema, A.K. (2020). Una evaluación integral de la contaminación por metales pesados en los productos alimenticios y el riesgo asociado para la salud humana: una perspectiva global. En *Problemas Ambientales Contemporáneos y Desafíos en la Era del Cambio Climático*; Singh, P., Singh, RP, Srivastava, V., Eds.; Springer: Singapur, 33–63. [https://doi.org/10.1007/978-981-32-9595-7\\_2](https://doi.org/10.1007/978-981-32-9595-7_2).
- Herath, H., Bandara, D., Weerasinghe, P., Iqbal, M. y Wijayawardhana, H. (2014). Effect of Cadmium on Growth Parameters and Plant Accumulation in Different Rice (*Oryza sativa* L.) Varieties in Sri Lanka. [Efecto del cadmio sobre los parámetros de crecimiento y la acumulación de plantas en diferentes variedades de arroz (*Oryza sativa* L.) en Sri Lanka]. *Tropical Agricultural Research* 25(4), 532-542. <http://doi.org/10.4038/tar.v25i4.8059>.
- Hernández-Baranda, Y., Rodríguez-Hernández, P., Peña-Icart, M., Meriño-Hernández, Y. y Cartaya-Rubio, O. (2019). Toxicity of Cadmium in plants and strategies to reduce its effects. Case study: The tomato. [Toxicidad del Cadmio en plantas y estrategias para reducir sus efectos. Caso de estudio: El tomate]. *Cultivos Tropicales*, 40(3). <https://www.redalyc.org/journal/1932/193262826010/movil/>.
- Hernández, R., Fernández, C. y Baptista, P. (2014). Metodología de la Investigación (Interamericana editores (ed.); 6th ed.). McGRAW-HILL. <https://www.uca.ac.cr/wp-content/uploads/2017/10/Investigacion.pdf>
- Hildebrandt, U., Regvar, M. y Bothe, H. (2007). Arbuscular mycorrhiza and heavy metal tolerance. [Micorrizas arbusculares y tolerancia a metales pesados]. *Phytochemistry*, 68(1), 139-146. <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2006.09.023>.
- Hu Z.-H., Zhuo F., Jing S.-H., Li X., Yan T.-X., Lei L.-L., Lu R.-R., Zhang X.-F. y Jing Y.-X. (2019). Combined application of arbuscular mycorrhizal fungi and steel slag improves plant growth and reduces Cd, Pb accumulation in *Zea mays*. *Int. J. Phytoremediat.*;21:857–865. doi: 10.1080/15226514.2019.1577355.
- Hu, Y. F., Zhou, G., Na, X. F., Yang, L., Nan, W. Bin, Liu, X., Zhang, Y. Q., Li, J. L. y Bi, Y. R. (2013). Cadmium interferes with maintenance of auxin homeostasis in *Arabidopsis* seedlings. [El cadmio interfiere con el mantenimiento de la homeostasis de las auxinas en las plántulas de *Arabidopsis*]. *Journal of Plant Physiology*, 170(11), 965-975. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2013.02.008>.

- Hu, J. L., Wu, F. Y., Wu, S. C., Lam, C. L., Lin, X. G. y Wong, M. H. (2014). Biochar y *Glomus caledonium* influyen en la acumulación de Cd de Upland Kangkong (*Ipomoea aquatica* Forsk.) Intercalado con Alfred Stonecrop (*Sedum alfredii* Hance). Informe científico 4, 4671. <https://doi.org/10.1038/srep04671>.
- Huaraca-Fernandez, J. N., Pérez-Sosa, L., Bustinza-Cabala, L. S. y Pampa-Quispe, N. B. (2020). Enmiendas orgánicas en la inmovilización de cadmio en suelos agrícolas contaminados: una revisión. *Información Tecnológica*, 31(4), 139-152. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642020000400139>.
- Intawongse, M. y Dean, J. R. (2006). Uptake of heavy metals by vegetable plants grown on contaminated soil and their bioavailability in the human gastrointestinal tract. [Absorción de metales pesados por plantas vegetales cultivadas en suelo contaminado y su biodisponibilidad en el tracto gastrointestinal humano]. *Food Additives and Contaminants*, 23(1), 36-48. <https://doi.org/10.1080/02652030500387554>.
- Irfan, M., Hayat, S., Ahmad, A. y Alyemeni, M.N. (2013). Soil cadmium enrichment: allocation and plant physiological manifestations. [Enriquecimiento de cadmio en el suelo: distribución y manifestaciones fisiológicas de la planta]. *Saudi Journal of Biological Sciences*. 20, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2012.11.004>.
- Jara, B. y Rueda, D. A. (2020). *Evaluación De Los Niveles De Cadmio En Cultivos De Arroz A Nivel De Suelo Y Grano, Ubicados En La Vereda Canaguaro Del Municipio De Granada Meta, Colombia*. [(Tesis de pregrado) Universidad Santo Tomás]. <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/28273>.
- Johnson D, Martin F, Cairney JWG Y Anderson IC. 2012. La importancia de los individuos: diversidad intraespecífica de plantas micorrícicas y hongos en los ecosistemas. *Nuevo fitólogo*, 194, 614 – 625. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2012.04087.x>
- Kanu, A. S., Ashraf, U., Mo, Z., Fuseini, I., Mansaray, L. R., Duan, M., Pan, S. y Tang, X. (2017). Cadmium Uptake and Distribution in Fragrant Rice Genotypes and Related Consequences on Yield and Grain Quality Traits. [Absorción y Distribución de Cadmio en Genotipos de Arroz Fragante y Consecuencias Relacionadas en Características de Rendimiento y Calidad del Grano]. *Journal of Chemistry*, 1-9. <https://doi.org/10.1155/2017/1405878>.
- Li, J., Lu, J., Li, X., Ren, T., Cong, R. y Zhou, L. (2014). Dinámica de liberación y adsorción de potasio en residuos de paja de arroz. *PLoS ONE*, 9(2), e90440. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0090440>.

- Li, X., Meng, D., Li, J., Yin, H., Liu, H., Liu, X. y Yan, M. (2017). Respuesta de las comunidades microbianas del suelo e interacciones microbianas a la contaminación por metales pesados a largo plazo. *Contaminación ambiental*. 231, 908–917. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.08.057>.
- Li, H., Luo, N., Li, Y. W., Cai, Q. Y., Li, H. Y., Mo, C. H. y Wong, M. H. (2017). Cadmio en el arroz: mecanismos de transporte, factores de influencia y medidas de minimización. *Environmental Pollution*, 224, 622-630. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.01.087>.
- Li, L., Wu, H., Van Gestel, C.A., Peijnenburg, W.J. y Allen, H.E. (2014). La acidificación del suelo aumenta la capacidad de extracción y la biodisponibilidad de los metales en los viejos suelos de huerta del noreste de la península de Jiaodong en China. *Environmental Pollution*, 88, 144-152. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2014.02.003>.
- Lien, K. W., Pan, M. H. y Ling, M. P. (2021). Levels of heavy metal cadmium in rice (*Oryza sativa* L.) produced in Taiwan and probabilistic risk assessment for the Taiwanese population. [Niveles de cadmio de metales pesados en arroz (*Oryza sativa* L.) producido en Taiwán y evaluación probabilística del riesgo para la población taiwanesa]. *Environmental Science and Pollution Research* 28, 28381-28390. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11902-w>.
- Liu, M., Lin, S., Dannenmann, M., Tao, Y., Saiz, G., Zuo, Q., Sippel, S., Wei, J., Cao, J., Cai, X. y Butterbach-Bahl, K. (2013). Do water-saving ground cover rice production systems increase grain yields at regional scales? [¿Los sistemas de producción de arroz para cubrir el suelo que ahorran agua aumentan los rendimientos de grano a escala regional?]. *Field Crops Research*, 150, 19-28. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2013.06.005>.
- Liu, Y., Wang, X., Zeng, G., Qu, D., Gu, J., Zhou, M. y Chai, L. (2007). Estrés oxidativo inducido por cadmio y respuesta del ciclo ascorbato-glutatión en (*Beckmeria nivea* L.) Gaud. *Chemosphere*, 69(1), 99-107. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2007.04.040>.
- Liu, W., Mi, J., Song, Z., Yan, J., Li, J. y Sang, T. (2014). Balance hídrico a largo plazo y producción sostenible de cultivos energéticos *Miscanthus* en la meseta de Loess de China. *Biomass and Bioenergy*, 62, 47-57. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.01.018>.

- Liu, L.Z., Gong, Z., Q., Zhang, Y.L y Li. P.J. (2014). Crecimiento, absorción de cadmio y acumulación de maíz (*Zea mays* L.) bajo los efectos de hongos micorrízicos arbusculares. *Ecotoxicology* 23, 1979-1986. <https://doi.org/10.1007/s10646-014-1331-6>.
- Liu, M., Sun, J., Li, Y. y Xiao, Y. (2017). El fertilizante nitrogenado mejora el crecimiento y la absorción de nutrientes de *Medicago sativa* L. inoculado con *Glomus tortuosum* cultivado en suelo ácido contaminado con Cd. *Chemosphere*. 167, 204–211. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.09.145>.
- Luo, N., Li, X., Chen, A.Y., Zhang, L.J., Zhao, H.M., Xiang, L., Cai, Q.Y, Mo, C.H., Hong, M.H. y Li, H. (2017). ¿El hongo micorriza arbuscular afecta la absorción de cadmio y las formas químicas en el arroz en diferentes etapas de crecimiento?, *Science of The Total Environment*. 599-600, 1564-1572. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.047>.
- Liu, Y. y Wei, XL. (2019). Dark Septate Endophyte mejora la tolerancia a la sequía de *Ormosia hosiei* Hemsley & EH Wilson al modular la morfología de la raíz, la ultraestructura y la proporción de hormonas de la raíz. *Bosques* 2019, 10, 830. <https://doi.org/10.3390/f10100830>
- Luo, N., Zhang, M. y Qi, D. (2017). Efectos de diferentes interacciones en el sentido de comunidad de los estudiantes en un entorno de aprendizaje electrónico. *Comput. Educ.* 115, 153-160. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2017.08.006>.
- McLaughlin, M. J., Maier, N. A., Rayment, G. E., Sparrow, L. A., Berg, G., McKay, A., Milham, P., Merry, R. H. y Smart, M. K. (1997). Cadmio en tubérculos de papa y suelos australianos. *Journal of Environmental Quality*, 26(6), 1644-1649. <https://doi.org/10.2134/jeq1997.00472425002600060026x>.
- Merlos, M. A., Zitka, O., Vojtech, A., Azcón-Aguilar, C. y Ferrol, N. (2016). El hongo micorrízico arbuscular *Rhizophagus irregularis* regula diferencialmente la respuesta al cobre de dos cultivares de maíz que difieren en la tolerancia al cobre. *Plant Science*, 253, 68-76. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2016.09.010>.
- Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego. (2021). Observatorio de siembra y perspectivas de producción de arroz. Boletín cuatrimestral, 3, 1-38. <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/3477458/Observatorio%20de%20las%20siembras%20y%20perspectivas%20de%20la%20producci%C3%B3n%20de%20Arroz%20-%20III%20Cuatrimestre.pdf>

- Ministerio de Agricultura y Riego (2017). Informe del arroz. Recuperado de: [http://repositorio.minagri.gob.pe/bitstream/MINAGRI/364/1/boletin-informearroz\\_final.pdf](http://repositorio.minagri.gob.pe/bitstream/MINAGRI/364/1/boletin-informearroz_final.pdf)
- Mori, S., Uraguchi, S., Ishikawa, S. y Arao, T. (2009). El proceso de carga del xilema es un factor crítico para determinar la acumulación de Cd en los brotes de *Solanum melongena* y *Solanum torvum*. *Environmental and Experimental Botany*, 67(1), 127-132. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2009.05.006>.
- Motesharezadeh, B., Savaghebi-Firoozabadi, G.R., Mirseyed Hosseini, H. y Alikhani, H.A. (2010). Study of the enhanced phytoextraction of cadmium in a calcareous soil. [Estudio de la fitoextracción mejorada de cadmio en un suelo calcáreo]. *International Journal of Environmental Research*, 4(3), 525-532. <https://doi.org/10.22059/IJER.2010.239>.
- Nanos, N. y Martín, J. A. (2012). Multiscale analysis of heavy metal contents in soils: spatial variability in the Duero river basin (Spain). [Análisis multiescala del contenido de metales pesados en suelos: variabilidad espacial en la cuenca del río Duero (España)]. *Geoderma*. 189, 554-562. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.06.006>.
- Parihar, M., Rakshit, A., Singh, H. B. y Rana, K. (2019). Diversidad de hongos micorrícicos arbusculares en suelos alcalinos de la ecorregión cálida subhúmeda de las llanuras del Ganges Medio de la India. *Acta agriculturae scandinavica, section B. Soil y plant Science*, 69(5), 386–397. <https://doi.org/10.1080/09064710.2019.1582692>.
- Peng, X., Huang, J., Liu, C., Xiang, Z., Zhou, J. y Zhong, G. (2012). Biodegradación de benculfurón-metilo por una nueva cepa de *Penicillium pinophilum*. BP-H-02. *Journal of Hazardous Materials*. 213, 216–221. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.01.077>.
- Pereira, P., Bogunovic, I., Muñoz Rojas, M. y Brevik, E. C. (2018). Servicios ecosistémicos del suelo, sostenibilidad, valoración y gestión. *Current Opinion in Environmental Science y Health*, 5, 7-13. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2017.12.003>.
- Pérez, U.A., Ramírez, M., Serralde, D.P., Peñaranda, A.M., Wilches, W.A., Ramírez, L. y Rengifo, G.A. (2019). Hongos formadores de micorrizas arbusculares (HFMA) como estrategia para reducir la absorción de cadmio en plantas de cacao (*Theobroma cacao*). *Terra Latinoamericana*, 37(2), 121-130. <https://doi.org/10.28940/terra.v37i2.479>
- Phillips, J. M. y Hayman, D. S. (1970). Procedimientos mejorados para limpiar raíces y teñir hongos micorrícicos parásitos y vesiculares-arbusculares para una evaluación rápida de la infección. *Transactions of the British Mycological Society*, 55(1), 158-IN18.

[https://doi.org/10.1016/S0007-1536\(70\)80110-3](https://doi.org/10.1016/S0007-1536(70)80110-3).

Prieto M.J., González R.C., Román G.A. y Prieto G.F. (2009). Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 10(1), 29-44. <https://www.redalyc.org/pdf/939/93911243003.pdf>.

Rafiq, M.T., Aziz, R., Yang, X., Xiao, W., Rafiq, M.K., Ali, B. y Li, T. (2014). Cadmium phytoavailability to rice (*Oryza sativa* L.) grown in representative Chinese soils. A model to improve soil environmental quality guidelines for food safety. [Fitodisponibilidad de cadmio en arroz (*Oryza sativa* L.) cultivado en suelos chinos representativos. Un modelo para mejorar las pautas de calidad ambiental del suelo para la seguridad alimentaria]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 103, 101-107. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoenv.2013.10.016>.

Redon, P. O., Beguiristain, T. y Leyval, C. (2008). Influence of *Glomus intraradices* on Cd partitioning in a pot experiment with *Medicago truncatula* in four contaminated soils. [Influencia de *Glomus intraradices* en la partición de Cd en un experimento en maceta con *Medicago truncatula* en cuatro suelos contaminados]. *Soil Biol Biochem* 40, 2710–2712. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2008.07.018>.

Restrepo, K. J., Montoya, M. I., Henao, P., Gutiérrez, L. A. y Molina, L. P. (2019). Characterization of arbuscular mycorrhizal fungi of livestock soils in tropical lowlands and tropical highlands in the department of Antioquia, Colombia. [Caracterización de hongos micorrízicos arbusculares de suelos ganaderos en tierras bajas tropicales y tierras altas tropicales en el departamento de Antioquia, Colombia]. *Idesia*, 37(1), 35-44. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292019005000301>.

Riaz, M., Kamran, M., Fang, Y., Wang, Q., Cao, H., Yang, G., Deng, L., Wang, Y., Zhou, Y., Anastopoulos, I. y Wang, X. (2021). Arbuscular mycorrhizal fungi-induced mitigation of heavy metal phytotoxicity in metal contaminated soils: a critical review. [Micorrización de la fitotoxicidad por metales pesados inducida por hongos micorrizales arbusculares en suelos contaminados con metales: una revisión crítica]. *Journal of Hazardous Materials*. 402, 123919. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123919>.

Rizwan, M., Ali, S., Hussain, A., Ali, Q., Shakoor, M. B., Zia-ur-Rehman, M., Farid, M. y Asma, M. (2017). Effect of zinc-lysine on growth, yield and cadmium uptake in wheat (*Triticum aestivum* L.) and health risk assessment. [Efecto de zinc-lisina en el crecimiento, rendimiento y absorción de cadmio en trigo (*Triticum aestivum* L.) y evaluación de riesgos para la salud]. *Chemosphere*, 187, 35-42. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.08.071>.

- Rodríguez-Gonzales, A., Zárate-Villarroe, S. G. y Bastida-Codina, A. (2022). Biodiversidad bacteriana presente en suelos contaminados con hidrocarburos para realizar biorremediación. *Revista de Ciencias Ambientales*, 56(1), 178-208. <https://doi.org/10.15359/rca.56-1.9>.
- Sánchez de Prager, M., Posada, R., Velásquez, D. y Narváez, M. (2010). Metodologías básicas para el trabajo con micorriza arbuscular y hongos formadores de micorriza arbuscular. Universidad Nacional de Colombia sede Palmira. 3-140. [https://www.academia.edu/44170428/Metodolog%C3%ADas\\_b%C3%A1sicas\\_para\\_el\\_trabajo\\_con\\_Micorriza\\_arbuscular\\_y\\_hongos\\_formadores\\_de\\_micorriza\\_arbuscular](https://www.academia.edu/44170428/Metodolog%C3%ADas_b%C3%A1sicas_para_el_trabajo_con_Micorriza_arbuscular_y_hongos_formadores_de_micorriza_arbuscular).
- Sandoval P.J. F., Pérez M.U. A., Rodríguez, A. y Torres R.E. (2020). Alta presencia de cadmio resulta en baja diversidad de hongos formadores de micorrizas arbusculares asociados a cacao (*Theobroma cacao* L.). *Acta Biologica Colombiana*; 25(3), 333-344. <http://dx.doi.org/10.15446/abc.v25n3.78746>.
- Shaari, N., Tajudin, M., Khandaker, M., Majrashi, A., Alenazi, M., Abdullah, U. y Mohd K.S. (2023). Síntomas de toxicidad por cadmio y mecanismo de absorción en plantas: una revisión. [Síntomas de toxicidad por cadmio y mecanismo de absorción en plantas: una revisión]. *Brazilian Journal of Biology*. 84. <https://doi.org/10.1590/1519-6984.252143>.
- Shah, F. A., Zeb, A., Ali, T., Muhammad, T., Faheem, M., Alam, S. I., Saeed, K., Koh, P.-O., Lee, K. W. y Kim, M. O. (2018). Identification of Proteins Differentially Expressed in the Striatum by Melatonin in a Middle Cerebral Artery Occlusion Rat Model: A Proteomic and in silico Approach. [Identificación de Proteínas Expresadas Diferencialmente en el Cuerpo Estriado por Melatonina en una Oclusión de la Arteria Cerebral Media Modelo Proteómico de Rata y Aproximación in silico]. *Frontiers in Neuroscience*, 12. <https://doi.org/10.3389/fnins.2018.00888>.
- Shen, H., Christie, P. y Li, X. (2006). Uptake of zinc, cadmium and phosphorus by arbuscular mycorrhizal maize (*Zea mays* L.) from a low available phosphorus calcareous soil spiked with zinc and cadmium. [Absorción de zinc, cadmio y fósforo por maíz micorrizal arbuscular (*Zea mays* L.) de un suelo calcáreo de fósforo disponible bajo enriquecido con zinc y cadmio]. *Environmental Geochemistry Health* 28, 111–119. <https://doi.org/10.1007/s10653-005-9020-2>.
- Sieverding, E. (1983). Manual de métodos para la investigación de la micorriza vesículo arbuscular en el laboratorio. *Centro Internacional de Agricultura Tropical. Cali*, 123. <https://cgspace.cgiar.org/handle/10568/54137>.

- Song, W., Chen, S., Liu, J., Chen, L., Song, N., Li, N. y Liu, B. (2015). Variation of Cd concentration in various rice cultivars and derivation of cadmium toxicity thresholds for paddy soil by species-sensitivity distribution. [Variación de la concentración de Cd en varios cultivares de arroz y derivación de los umbrales de toxicidad de cadmio para suelo de arroz según la distribución de sensibilidad de especies]. *Journal of Integrative Agriculture*, 14(9), 1845-1854. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(14\)60926-6](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(14)60926-6).
- Song, Y., Jin, L. y Wang, X. (2017). Cadmium absorption and transportation pathways in plants. [Vías de absorción y transporte de cadmio en las plantas]. *International Journal of Phytoremediation*, 19(2), 133-140. <https://doi.org/10.1080/15226514.2016.1207598>.
- Sumczynski, D., Koubová, E., Šenkárová, L. y Orsavová, J. (2018). Rice flakes produced from commercial wild rice: Chemical compositions, vitamin B compounds, mineral and trace element contents and their dietary intake evaluation. [Copos de arroz producidos a partir de arroz silvestre comercial: Composiciones químicas, compuestos de vitamina B, contenido de minerales y oligoelementos y evaluación de su ingesta dietética]. *Food Chemistry*, 264, 386-392. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.05.061>.
- Symanczik, S., Lehmann, M. F., Wiemken, A., Boller, T. y Courty, P.E. (2018). Effects of two contrasted arbuscular mycorrhizal fungal isolates on nutrient uptake by *Sorghum bicolor* under drought. [Efectos de dos aislamientos de hongos micorrízicos arbusculares contrastados sobre la absorción de nutrientes por *Sorghum bicolor* bajo sequía]. *Mycorrhiza*, 28(8), 779-785. <https://doi.org/10.1007/s00572-018-0853-9>.
- Thévenod, F. y Lee, W. K. (2013). Toxicology of Cadmium and Its Damage to Mammalian Organs, [Toxicología del cadmio y su daño a los órganos de mamíferos]. *Metal Ions in Life Sciences*, 415-490. [https://doi.org/10.1007/978-94-007-5179-8\\_14](https://doi.org/10.1007/978-94-007-5179-8_14).
- 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. [La simbiosis de micorrizas arbusculares como un recurso prometedor para mejorar la calidad de las bayas en vides en entornos cambiantes]. *Frontiers in Plant Science*, 9. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00897>
- Ueno, D., Yamaji, N., Kono, I., Huang, C., Ando, T., Yano, M. y Ma, J. (2010). Gene limiting cadmium accumulation in rice. [Gen limitante de la acumulación de cadmio en el arroz]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(38). <https://doi.org/10.1073/pnas.1005396107>.

- Uraguchi, S., Mori, S., Kuramata, M., Kawasaki, A., Arai, T. y Ishikawa, S. (2009). Root-to-shoot Cd translocation via the xylem is the major process determining shoot and grain cadmium accumulation in rice. [La translocación de Cd de raíz a brote a través del xilema es el principal proceso que determina la acumulación de cadmio en brotes y granos en arroz]. *Journal of Experimental Botany*, 60, 2677-2688. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/19401409/>.
- USEPA. (1996). Method 3050B acid digestion of sediments, sludges, and soils. USEPA (United States Environmental Protection Agency). [Método 3050B digestión ácida de sedimentos, lodos y suelos. USEPA (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos)]. <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-06/documents/epa-3050b.pdf>.
- Vallejos-Torres, G., Tenorio-Cercado, M., Gaona-Jimenez, N., Corazón-Guivin, M., Ormeño-Luna, J., Paredes, C., Saavedra, J., Tuesta, J., Tuesta, O., Alguacil, MM, Becerra, A. y Marín, C. (2022). Multiplicación de hongos micorrízicos arbusculares aislados de suelos cultivados con cacao. *Bioagro*, 34(3), 265-276. <https://doi.org/10.51372/bioagro343.6>.
- Vallejos-Torres, G., Torres, S.C., Gaona-Jimenez, N., Saavedra, J., Tuesta, J.C., Alejandra, G.B., Tuesta, O.A., Marín, C. y Alguacil, M. M. (2022). The combined effect of arbuscular mycorrhizal fungi and compost improves growth and soil parameters and decreases cadmium absorption in cacao (*Theobroma cacao* L.) Plants. [El efecto combinado de hongos micorrízicos arbusculares y compost mejora el crecimiento y los parámetros del suelo y disminuye la absorción de cadmio en las plantas de cacao (*Theobroma cacao* L.)]. *Journal Soil Science Plant. Nutrition* 22, 5174-5182. <https://doi.org/10.1007/s42729-022-00992-9>.
- Wang, F., Zhang, S., Cheng, P., Zhang, S. y Sun, Y. (2020). Effects of Soil Amendments on Heavy Metal Immobilization and Accumulation by Maize Grown in a Multiple-Metal-Contaminated Soil and Their Potential for Safe Crop Production. *Toxics*, 8(4), 102. <https://doi.org/10.3390/toxics8040102>
- Wang, Y., Jiang, X., Li, K., Wu, M., Zhang, R. y Zhang, L. (2014). Photosynthetic responses of *Oryza sativa* L. seedlings to cadmium stress: physiological, biochemical and ultrastructural analyses. [Respuestas fotosintéticas de plántulas de *Oryza sativa* L. al estrés por cadmio: análisis fisiológicos, bioquímicos y ultraestructurales]. *Biometals*, 27, 389–401. <https://doi.org/10.1007/s10534-014-9720-0>.
- Wipf, D., Krajinski, F., Tuinen, D., Recorbet, G. y Courty, P. (2019). Trading on the arbuscular mycorrhiza market: from arbuscules to common mycorrhizal networks. [Comercio en el mercado de micorrizas arbusculares: de arbusculos a redes de micorrizas comunes]. *New Phytologist*, 223(3), 1127-1142. <https://doi.org/10.1111/nph.15775>.

- Wu, Q. S., Zou, Y. N. y He, X. H. (2010). Contributions of arbuscular mycorrhizal fungi to growth, photosynthesis, root morphology and ionic balance of citrus seedlings under salt stress. [Contribuciones de hongos micorrízicos arbusculares al crecimiento, fotosíntesis, morfología de raíces y balance iónico de plántulas de cítricos bajo estrés salino]. *Acta Physiologiae Plantarum*, 32, 297–304. <https://doi.org/10.1007/s11738-009-0407-z>.
- Yang, Y., Chen, W., Wang, M. y Peng, C. (2016). Regional accumulation characteristics of cadmium in vegetables: influencing factors, transfer model and indication of soil threshold content. [Características regionales de acumulación de cadmio en vegetales: factores influyentes, modelo de transferencia e indicación del contenido umbral del suelo]. *Environmental Pollution*, 219, 1036-1043. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2016.09.003>.
- Yu, Z., Zhao, X., Liang, X., Li, Z., Wang, L., He, Y. y Zhan, F. (2022). Los hongos micorrízicos arbusculares reducen la lixiviación de cadmio de las columnas de arena al reducir la disponibilidad y mejorar la absorción por las raíces de maíz. *Journal of Fungi*, 8 (8), 866. MDPI AG. Obtenido de <http://dx.doi.org/10.3390/jof8080866>
- Zhai, X., Li, Z., Huang, B., Luo, N., Huang, M., Zhang, Q. y Zeng, G. (2018). Remediation of multiple heavy metal-contaminated soil through the combination of soil washing and in situ immobilization. [Remediación de suelos contaminados con múltiples metales pesados mediante la combinación de lavado de suelos e inmovilización in situ]. *The Science of the Total Environment*, 635, 92-99. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.119>.
- Zhang, J., Zhu, Y., Yu, L., Yang, M., Zou, X., Yin, C. y Lin, Y. (2022). Research Advances in Cadmium Uptake, Transport and Resistance in Rice (*Oryza sativa* L.). [Avances de investigación en absorción, transporte y resistencia de cadmio en arroz (*Oryza sativa* L.)]. *Cells*, 11(3), 569. MDPI AG. Retrieved from. <http://dx.doi.org/10.3390/cells11030569>.
- Zhang, Z., Wu, X., Tu, C., Huang, X., Zhang, J. Ch., Fang, H., Huo, H. y Lin, Ch. (2020). Relationships between Soil Properties and the Accumulation of Heavy Metals in Different *Brassica campestris* L. Growth Stages in a Karst Mountainous Area. [Relaciones entre las propiedades del suelo y la acumulación de metales pesados en diferentes estados de crecimiento de *Brassica campestris* L. en una zona montañosa kárstica]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 206, 111150. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111150>.

- Zhang, X. D., Wang, Y., Li, H. B. y Yang, Z. M. (2018). Isolation and identification of rapeseed (*Brassica napus*) cultivars for potential higher and lower Cd accumulation. [Aislamiento e identificación de cultivares de colza (*Brassica napus*) para una mayor y menor acumulación potencial de Cd]. *Journal Plant Nutrition Soil Science*, 181, 479-487. <https://doi.org/10.1002/jpln.201700531>.
- Zhunaula, S.T., Coaquira, W., Curasi, R., Unchupaico, P.I., Angeles, J., Gioda, A. y Huamán De La Cruz, A.R. (2021). Estimation of arsenic contents in rice purchased on Peruvian markets and estimation of dietary intake by Peruvians through rice consumption. [Estimación del contenido de arsénico en arroz comprado en los mercados peruanos y estimación de la ingesta dietética de los peruanos a través del consumo de arroz]. *Scientia Agropecuaria*, 12(2), 185-191. <https://dx.doi.org/10.17268/sci.agropecu.2021.021>.
- Zúñiga-Sánchez, E., Martínez-Barajas, E., Zavaleta-Mejía, E. y Gamboa-de-Buen, A. (2017). El floema y la ruta simplástica durante la formación de órganos de demanda. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 40 (3), 249-259. <https://www.redalyc.org/journal/610/61050549001/html/>

## TERMINOLOGÍA

**Biodisponibilidad de cadmio.** Se define como el grado en el que las sustancias químicas como el Cd presentes en el suelo, pueden ser absorbidas o metabolizadas por receptores humanos o naturales, o quedar disponibles para interactuar con los sistemas biológicos (Intawongse y Dean, 2006).

**Biorremediación.** Herramienta prometedora para la degradación microbiana de los contaminantes que permanecen en el medio ambiente (Pang *et al.*, 2020).

**Cadmio en suelos.** Concentración de metal pesado presente en la superficie terrestre a causa de la aplicación de fertilizantes, abonos y lodos de depuradoras, riego con aguas residuales industriales y deposición atmosféricas por actividades industriales y urbanas (Liu *et al.*, 2007)

**Cadmio en arroz.** Concentración de cadmio en la planta de arroz que afecta el crecimiento en su cultivo como la absorción de nutrientes a través de la interacción con la fotosíntesis, la respiración y la asimilación de nitrógeno (Li *et al.*, 2017).

**Consumo de arroz.** Es un procedimiento habitual de ingesta de un cereal con alta demanda de producción por el precio e incremento en la población peruana”. (Ministerio de Agricultura y Riego [MINAGRI], 2017).

**Fitotoxicidad en plantas.** La capacidad o la propiedad de una sustancia de causar efectos adversos sobre las plantas. (Hernández-Baranda *et al.*, 2019).

**Grano de arroz.** Es un cereal formado por una capa protectora exterior que lo cubre, llamada cáscara (I(Sumczynski *et al.*, 2018).

**Metal pesado.** Es aquel elemento que tiene una densidad igual o superior a  $5 \text{ g cm}^3$  cuando está en forma elemental o cuyo número atómico es superior a 20  $\text{g cm}^3$ , excluyendo los metales alcalinos y alcalino-térreos (Nanos y Martín, 2012).

**Método de EPA 3050B.** Procedimiento para Medir la espectrofotometría de absorción atómica con llama. (USEPA, 1996).

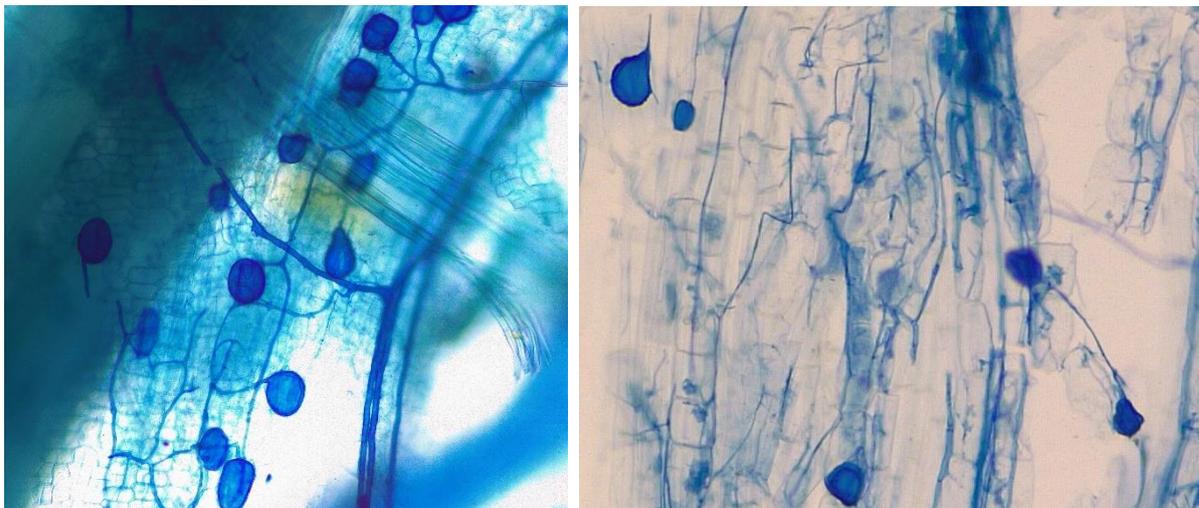
**Mutualismo micorrízico.** Es la asociación planta hospedante y hongos micorrízicos (Johnson *et al.*, 2012).

**Secuestro vacuolar.** Es un proceso de defensa muy importante que permite tolerar la toxicidad del cadmio en las plantas (Zhang *et al.*, 2022).

**Xilema.** Es parte del tejido vascular en plantas que sirve para transportar agua y minerales desde las raíces hacia los órganos de las plantas (Zúñiga-Sánchez *et al.*, 2017).

## APÉNDICES

**Apéndice 1.** Colonización en raíces, medido en el estereoscopio y microscopio binocular



**Apéndice 2.** Promedio de datos del contenido de cadmio en raíces y tallos, colonización y Potencial de hidrógeno(pH)

Tratamientos	Rep.	Cadmio en Raíz (ppm)	Cadmio en brote (ppm)	Colonización (%)	Potencial de hidrógeno (Ph)
Tratamiento 1	P1	0	0	0	6,52
	P2	0	0	0	5,8
	P3	0	0	0	6,16
Tratamiento 2	P1	10,66	1,94	0	7,19
	P2	10,69	1,73	0	7,01
	P3	10,68	1,84	0	7,1
Tratamiento 3	P1	0	0	88,33	7,46
	P2	0	0	81,67	7,41
	P3	0	0	85	7,435
Tratamiento 4	P1	7,35	1,73	13,33	7,39
	P2	9,3	1,56	10	7,45
	P3	8,33	1,65	15	7,42

**Apéndice 3.** Prueba de normalidad de datos mediante Shapiro Wilk

	<b>RDUO Cadmio en raíz (ppm)</b>	<b>RDUO Cadmio en tallo (ppm)</b>	<b>RDUO Colonización (%)</b>	<b>RDUO pH</b>
n	12	12	12	12
D. E	0,42	0,06	1,79	0,16
p (Unilateral D)	<0,0001	0,0313	0,0752	0,1053
Normal	<b>No</b>	<b>No</b>	<b>Si</b>	<b>Si</b>

**Apéndice 4.** Prueba de homocedasticidad u homogeneidad de varianzas mediante Levine para Cadmio en raíz

<b>F.V.</b>	<b>SC</b>	<b>gl</b>	<b>CM</b>	<b>F</b>	<b>p-valor</b>
Modelo	0,94	3	0,31	4	<b>0,052</b>
Inóculo de HMA	0,31	1	0,31	3,9	<b>0,0836</b>
Cadmio (ppm)	0,33	1	0,33	4,18	<b>0,752</b>
Inóculo de micorriza+Cd	0,31	1	0,31	3,9	<b>0,0836</b>
Error	0,63	8	0,08		
Total	1,57	11			

**Apéndice 5.** Prueba de homocedasticidad u homogeneidad de varianzas mediante Levine para Cadmio en tallo

<b>F.V.</b>	<b>SC</b>	<b>gl</b>	<b>CM</b>	<b>F</b>	<b>p-valor</b>
Modelo	0,01	3	4,20E-03	2,99	<b>0,0957</b>
Inóculo de HMA	1,30E-04	1	1,30E-04	0,09	<b>0,767</b>
Cadmio (ppm)	0,01	1	0,01	8,78	<b>0,018</b>
Inóculo de micorriza+Cd	1,30E-04	1	1,30E-04	0,09	<b>0,767</b>
Error	0,01	8	1,40E-03		
Total	0,02	11			

**Apéndice 6.** Prueba de homocedasticidad u homogeneidad de varianzas mediante Levine para colonización

<b>F.V.</b>	<b>SC</b>	<b>gl</b>	<b>CM</b>	<b>F</b>	<b>p-valor</b>
Modelo	12,63	3	4,21	3,35	<b>0,0764</b>
Inóculo de HMA	12,43	1	12,43	9,87	<b>0,0138</b>
Cadmio (ppm)	0,1	1	0,1	0,08	<b>0,7831</b>
Inóculo de micorriza+Cd	0,1	1	0,1	0,08	<b>0,7831</b>
Error	10,07	8	1,26		
Total	22,71	11			

**Apéndice 7.** Prueba de homocedasticidad u homogeneidad de varianzas mediante Levine para pH

<b>F.V.</b>	<b>SC</b>	<b>gl</b>	<b>CM</b>	<b>F</b>	<b>p-valor</b>
Modelo	0,1	3	0,03	2,89	<b>0,1022</b>
Inóculo de HMA	0,05	1	0,05	4,48	<b>0,0671</b>
Cadmio (ppm)	0,02	1	0,02	2,02	<b>0,1933</b>
Inóculo de micorriza+Cd	0,03	1	0,03	2,17	<b>0,1787</b>
Error	0,09	8	0,01		
Total	0,19	11			

**Interpretación:**

La prueba de normalidad de datos, se calculó mediante Shapiro Wilk porque el total de unidades experimentales no supera los 50 (12 unidades) siendo este estadígrafo el que mejor se adapta bajo estas condiciones, se determinó que solo las variables colonización y pH cumplieron con la distribución normal de datos obtenidos en campo; sin embargo, en la prueba de homogeneidad de varianzas, calculado mediante Levine, no se cumple este supuesto en las variables Cd en raíces, brote y colonización (solo pH cumplió) ya que los datos del p-valor de los factores analizados son mayores al 0,05. En conclusión, se tuvieron que transformar datos a la función Raíz Cuadrada (X) de las variables Cd en raíces, Cd en brotes y colonización, solo la variable pH cumplió los supuestos de normalidad de datos y homogeneidad de varianzas, por lo cual no fue necesario aplicar transformación de datos.