

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

Escuela Académico Profesional de Ingeniería Ambiental

Tesis

**Efecto de microorganismos eficientes en la  
fitorremediación de cadmio por *Zea mays* L.  
en suelo contaminado de Sincos, 2021**

Noemi Silvia Hinostroza Huanuco

Para optar el Título Profesional de  
Ingeniero Ambiental

Huancayo, 2024

Repositorio Institucional Continental  
Tesis digital



Esta obra está bajo una Licencia "Creative Commons Atribución 4.0 Internacional" .

**INFORME DE CONFORMIDAD DE ORIGINALIDAD DE TRABAJO DE  
INVESTIGACIÓN**

**A** : Decano de la Facultad de Ingeniería  
**DE** : Andrés Alberto Azabache Leytón  
Asesor de trabajo de investigación  
**ASUNTO** : Remito resultado de evaluación de originalidad de trabajo de investigación  
**FECHA** : 23 de Agosto de 2024

Con sumo agrado me dirijo a vuestro despacho para informar que, en mi condición de asesor del trabajo de investigación:

**Título:**

Efecto de microorganismos eficientes en la fitorremediación de cadmio por *Zea mays L.* en suelo contaminado de Sincos, 2021.

**Autor:**

NOEMI SILVIA HINOSTROZA HUANUCO – EAP. Ingeniería Ambiental

Se procedió con la carga del documento a la plataforma “Tumitin” y se realizó la verificación completa de las coincidencias resaltadas por el software dando por resultado 18 % de similitud sin encontrarse hallazgos relacionados a plagio. Se utilizaron los siguientes filtros:

- Filtro de exclusión de bibliografía SI  NO
- Filtro de exclusión de grupos de palabras menores  
Nº de palabras excluidas (en caso de elegir “sí”): <20 SI  NO
- Exclusión de fuente por trabajo anterior del mismo estudiante SI  NO

En consecuencia, se determina que el trabajo de investigación constituye un documento original al presentar similitud de otros autores (citas) por debajo del porcentaje establecido por la Universidad Continental.

Recae toda responsabilidad del contenido del trabajo de investigación sobre el autor y asesor, en concordancia a los principios expresados en el Reglamento del Registro Nacional de Trabajos conducentes a Grados y Títulos – RENATI y en la normativa de la Universidad Continental.

Atentamente,

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Universidad Continental, en especial a la facultad de Ingeniería Ambiental, por la formación académica, sus enseñanzas serán un bien trascendental en mi vida como ciudadana y profesional.

A mi asesor de tesis, por su confianza, su respaldo y su apoyo ante cada interrogante para desarrollar de la mejor y correcta manera la presente tesis.

A mis docentes, de todos mis niveles educativos, que fueron parte de mi proceso estudiantil, por la paciencia, la entrega y la metodología de cada uno de ellos que dejaron una huella bonita de esperanza y de gratitud en mi ser.

A mis jurados, por la paciencia y guía constante que ha sido enriquecedor.

## **DEDICATORIA**

A Dios, por la vida y su bendición de todos los días en esta vida terrenal.

A mis padres, Juan y Estela, por su infinito amor que han sido la base de mi personalidad, por ser mi soporte en cada paso de mi vida y por todo el apoyo infinito e incansable que me dan, sin ellos nada hubiera sido posible.

A mi hermano Leopoldo, a quien quiero y admiro tanto, a él por ser mi cómplice, un ser leal con quien siempre puedo contar y por darme la fortaleza que muchas veces necesité en este largo caminar.

A Leah, mi hija, mi mayor tesoro, mi motivación e inspiración para hacer cada cosa con amor y perfección.

A Hari, Esmeralda, Paola y Jackeline, a quienes quiero tanto, en quienes confío y tengo la esperanza que recibirán mi tesis como un material muy significativo en alguna parte de sus vidas.

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

<b>Agradecimientos.....</b>	<b>iv</b>
<b>Dedicatoria .....</b>	<b>v</b>
<b>Índice de contenidos.....</b>	<b>vi</b>
<b>Lista de tablas.....</b>	<b>ix</b>
<b>Lista de figuras.....</b>	<b>x</b>
<b>Resumen.....</b>	<b>xi</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>xii</b>
<b>Introducción .....</b>	<b>xiii</b>
<b>Capítulo I.....</b>	<b>15</b>
<b>Planteamiento del estudio.....</b>	<b>15</b>
1.1. Planteamiento y formulación del problema .....	15
1.1.1. Planteamiento del problema.....	15
1.1.2. Formulación del problema .....	16
1.1.2.1. Problema general.....	16
1.1.2.2. Problemas específicos .....	16
1.2. Objetivos .....	17
1.2.1. General.....	17
1.2.2. Específicos .....	17
1.2.3. Justificación e importancia .....	17
1.2.4. Justificación teórica .....	17
1.2.5. Justificación metodológica.....	18
1.2.6. Justificación ambiental.....	18
1.2.7. Justificación práctica.....	18
1.2.8. Importancia .....	18
1.3. Hipótesis y descripción de variables .....	19
1.3.1. Hipótesis .....	19
1.3.1.1. General .....	19
1.3.1.2. Específicas .....	19
1.3.2. Descripción de variables.....	20
<b>Capítulo II .....</b>	<b>22</b>
<b>Marco teórico .....</b>	<b>22</b>
2.1. Antecedentes del problema .....	22
2.1.1. Nacionales.....	22
2.1.2. Internacionales .....	24
2.2. Bases teóricas .....	27

2.2.1. El cadmio (Cd) en el suelo.....	27
2.2.1.1. Toxicidad del Cd.....	27
2.2.1.2. Contenido de Cd en el suelo.....	28
2.2.1.3. Fuentes antropogénicas de cadmio.....	29
2.2.1.4. Reacciones del Cd en el suelo.....	30
2.2.2. Los microorganismos eficientes .....	31
2.2.2.1. Caracteres generales.....	31
2.2.3. La fitorremediación.....	35
2.2.3.1. Características .....	35
2.2.3.2. Fitorremediación asistida por microorganismos .....	37
2.2.4. El cultivo de maíz como fitorremediador .....	39
2.3. Definición de términos básicos .....	40
<b>Capítulo III.....</b>	<b>43</b>
<b>Metodología .....</b>	<b>43</b>
3.1. Método y alcance de la investigación .....	43
3.1.1. Método de investigación.....	43
3.1.1.1. General.....	43
3.1.1.2. Específico.....	43
3.1.2. Alcance de la investigación .....	43
3.1.2.1. Tipo de investigación .....	43
3.1.2.2. Nivel de investigación.....	44
3.2. Diseño de la investigación .....	44
3.3. Población y muestra .....	47
3.3.1. Población .....	47
3.3.2. Muestra .....	47
3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	48
3.4.1. Evaluaciones realizadas .....	48
3.4.1.1. Altura de planta.....	48
3.4.1.2. Longitud de raíz .....	49
3.4.1.3. Materia seca aérea.....	49
3.4.1.4. Materia seca radicular .....	49
3.4.1.5. Análisis de cadmio total en la parte aérea.....	49
3.4.1.6. Análisis de cadmio total en la parte radicular .....	49
3.4.1.7. Factor de traslocación (FT).....	49
3.4.1.8. Factor de bioconcentración (FBC).....	50
3.4.1.9. Contenido final de Cd en el suelo .....	50
3.4.2. Procesamiento de datos.....	50

<b>Capítulo IV .....</b>	<b>51</b>
<b>Resultados y discusión .....</b>	<b>51</b>
4.1. Resultados del tratamiento y análisis de la información .....	51
4.1.1. Efecto de la dosis de los microorganismos eficientes de los indicadores de fitorremediación.....	51
4.1.1.1. Factor de bioconcentración aérea (FBa) .....	51
4.1.1.2. Factor de bioconcentración radicular (FBr) .....	52
4.1.1.3. Factor de bioconcentración total (FBt) .....	52
4.1.1.4. Factor de traslocación (FT) .....	52
4.1.2. Efecto de la dosis de los microorganismos eficaces en el crecimiento de maíz ....	53
4.1.2.1. Altura de planta.....	53
4.1.2.2. Longitud de raíz .....	53
4.1.2.3. Materia seca de la parte aérea .....	54
4.1.2.4. Materia seca de raíz.....	54
4.1.3. Contenido de cadmio total en el suelo .....	54
4.2. Prueba de hipótesis.....	55
4.2.1. Hipótesis específica 1 .....	55
4.2.1.1. Factor de bioconcentración aérea (FBa) .....	55
4.2.1.2. Factor de bioconcentración radicular (FBr) .....	56
4.2.1.3. Factor de bioconcentración total (FBt) .....	57
4.2.1.4. Factor de traslocación (FT) .....	57
4.2.2. Hipótesis específica 2: .....	58
4.2.2.1. Altura de planta.....	58
4.2.2.2. Longitud de raíz .....	60
4.2.2.3. Materia seca aérea .....	61
4.2.2.4. Materia seca radicular .....	62
4.2.3. Hipótesis específica 3 .....	63
4.2.3.1. Contenido final de cadmio en el suelo .....	63
4.2.3.2. Variación del contenido final de Cd en el suelo .....	64
4.3. Discusión de resultados.....	64
<b>Conclusiones .....</b>	<b>68</b>
<b>Recomendaciones .....</b>	<b>69</b>
<b>Lista de referencias .....</b>	<b>70</b>
<b>Anexos .....</b>	<b>83</b>

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Operacionalización de variables .....	21
Tabla 2. Tratamientos en estudio .....	44
Tabla 3. Caracterización fisicoquímica del suelo del experimento.....	45
Tabla 4. Georreferenciación de los puntos de muestreo para obtener la muestra compuesta de la capa arable .....	48
Tabla 5. Esquema del análisis de variancia del diseño completamente al azar .....	50
Tabla 6. Resultados del FBa de maíz en el suelo de Sincos .....	51
Tabla 7. Resultados del FBr de maíz en el suelo de Sincos.....	52
Tabla 8. Resultados del FBt de maíz en el suelo de Sincos .....	52
Tabla 9. Resultados del FT de maíz en el suelo de Sincos .....	52
Tabla 10. Resultados de la altura de planta de maíz (cm) en un suelo de Sincos .....	53
Tabla 11. Resultados de la longitud de raíz de maíz (cm) en un suelo de Sincos.....	53
Tabla 12. Resultados de la materia seca aérea de maíz (g) en un suelo de Sincos .....	54
Tabla 13. Resultados de la materia seca radicular de maíz (g) en un suelo de Sincos.....	54
Tabla 14. Resultados del contenido de Cd total en el suelo de Sincos .....	54
Tabla 15. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para el FBa.....	55
Tabla 16. Prueba de Kruskal-Wallis para el FBa.....	55
Tabla 17. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para el FBa.....	56
Tabla 18. Análisis de variancia para el FBr.....	56
Tabla 19. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para el FBt .....	57
Tabla 20. Prueba de Kruskal-Wallis para el FBt .....	57
Tabla 21. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para el FT.....	58
Tabla 22. Análisis de variancia para el FT.....	58
Tabla 23. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para la altura de planta de maíz .....	59
Tabla 24. Cuadrado medio del análisis de variancia para la altura de planta de maíz (cm) ....	59
Tabla 25. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para longitud de raíz de maíz.....	60
Tabla 26. Análisis de variancia para la longitud de raíz de maíz (cm) .....	60
Tabla 27. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para la materia seca aérea de maíz .....	61
Tabla 28. Prueba de Kruskal-Wallis para materia seca aérea de maíz (g) .....	61
Tabla 29. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para la materia seca radicular de maíz.....	62
Tabla 30. Análisis de variancia para materia seca radicular de maíz (g) .....	63
Tabla 31. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para el contenido final de Cd en el suelo..	63
Tabla 32. Análisis de variancia para el contenido final de Cd en el suelo ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ).....	64
Tabla 33. Variación (%) del contenido final de cadmio .....	64

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Estrategias de fitorremediación de metales de diferentes fuentes contaminadas y el movimiento de metales en células y tejidos de plantas vía xilema y floema .....	36
Figura 2. Mecanismos de biorremediación de microorganismos .....	38
Figura 3. Representación esquemática de la fitoextracción de metales del suelo.....	39
Figura 4. Diagrama de flujo del proceso experimental .....	47
Figura 5. Ubicación de la parcela agrícola de Sincos con suelo contaminado.....	48
Figura 6. Contraste cuadrático del efecto de dosis de ME en altura de planta de maíz .....	59
Figura 7. Contraste cuadrático del efecto de dosis de ME en materia seca aérea de maíz .....	62
Figura 8. Parcela agrícola de Sincos contaminada con Cd. ....	90
Figura 9. Tamizado de la muestra de suelo.....	90
Figura 10. Pesado del suelo contaminado de Sincos .....	91
Figura 11. Cinco tratamiento y tres repeticiones del experimento.....	91
Figura 12. Emergencia del maíz .....	92
Figura 13. Crecimiento de maíz.....	92
Figura 14. Crecimiento de maíz.....	93
Figura 15. Cultivo de maíz antes de la cosecha .....	93
Figura 16. Tratamiento 1 al final del experimento.....	94
Figura 17. Tratamiento 2 al final del experimento.....	94
Figura 18. Tratamiento 3 al final del experimento.....	95
Figura 19. Tratamiento 4 al final del experimento.....	95
Figura 20. Tratamiento 5 al final del experimento.....	96

## RESUMEN

Objetivo: Determinar el efecto de la aplicación de microorganismos eficaces en la fitorremediación de cadmio en un suelo contaminado de Sincos, Jauja. Metodología: Se ensayó cinco dosis de microorganismos eficaces (ME): 0 %, 2.5 %, 5.0 %, 7.5 % y 10 %, dispuestos en un diseño completamente al azar, con tres repeticiones. Se utilizó como especie vegetal *Zea mays* L., sembrado en macetas de 5 kg de capacidad, con suelo contaminado de Sincos, por un periodo de 80 días. Se evaluaron los indicadores de fitorremediación: factor de bioconcentración (FBC) aéreo, radicular y total, factor de traslocación (FT), crecimiento de maíz: altura de planta, longitud de raíz, materia seca aérea y radicular; así como, el contenido de Cd en el suelo al final del experimento. Resultados y conclusiones: El FB aéreo, radicular y total fue incrementado con 10 % de ME, pero sin diferencias significativas con los demás tratamientos. El FT no presentó diferencias significativas entre tratamientos y fue menor que 1, mostrando al maíz como planta fitoestabilizadora. La altura de planta y la materia seca aérea de maíz fueron significativamente superiores con 5 % de ME. La longitud de raíz y la materia seca de raíz no presentó significación estadística entre tratamientos. El contenido de Cd en el suelo al final del experimento disminuyó en 23.48 % con 10 % de ME, sin diferencias significativas con los demás tratamientos. El maíz ve favorecido su crecimiento con los microorganismos eficaces, pero tiene una relativamente baja disminución de Cd en el suelo y en los indicadores de fitorremediación, considerándose una planta fitoestabilizadora.

**Palabras claves:** cadmio, fitorremediación, microorganismos eficientes, *Zea mays* L.

## ABSTRACT

Objective: To determine the effect of applying effective microorganisms in cadmium phytoremediation in contaminated soil in Sincos, Jauja. Methodology: Five doses of effective microorganisms (ME) were tested: 0%, 2.5%, 5.0%, 7.5% and 10%, arranged in a Completely Random Design, with three repetitions. *Zea mays* L. was used as plant species, planted in pots of 5 kg capacity, with Sincos contaminated soil, for a period of 80 days. Phytoremediation indicators were evaluated: aerial, root and total bioconcentration factor (BCF), translocation factor (TF), corn growth: plant height, root length, aerial and root dry matter; as well as the Cd content in the soil at the end of the experiment. Results and conclusions: The aerial, root and total BF was increased with 10% ME, but without significant differences with the other treatments. The FT did not present significant differences between treatments and was less than 1, showing maize as a phytostabilizing plant. Plant height and aerial dry matter of corn were significantly higher with 5% ME. Root length and root dry matter did not show statistical significance between treatments. The Cd content in the soil at the end of the experiment decreased by 23.48% with 10% ME, without significant differences with the other treatments. Maize sees its growth favored with effective microorganisms, but it has a low decrease in Cd in the soil and in the phytoremediation indicators, being considered a phytostabilizing plant.

**Keywords:** cadmium, phytoremediation, efficient microorganisms, *Zea mays* L.

## INTRODUCCIÓN

El suelo forma parte integral del recurso agrícola y juega un rol vital en la seguridad alimentaria. Debido a la rápida urbanización e industrialización, las tierras agrícolas han incrementado su contaminación con compuestos orgánicos e inorgánicos (1).

Dentro de los compuestos inorgánicos están los metales pesados que no son biodegradables, se acumulan en los diferentes ecosistemas y posteriormente contaminan la cadena alimentaria. Esta contaminación representa, entonces, un riesgo para la salud humana y ambiental. Algunos metales son cancerígenos, disruptores, mutagénicos, teratogénicos y endocrinos, mientras que otros causan cambios neurológicos y de comportamiento especialmente en niños. Por lo tanto, la remediación de la contaminación por metales pesados merece la debida atención. Los diferentes métodos físicos y químicos utilizados tienen limitaciones como el alto costo, la intensiva mano de obra, alteración de propiedades del suelo y perturbación de la flora y fauna del suelo. Por el contrario, la fitorremediación es una mejor solución al problema (2).

El suelo contaminado impacta la calidad de los alimentos y nutrientes de la biota animal y los humanos. El suelo está principalmente contaminado por descargas de efluentes de industrias, los cuales están ampliamente clasificados en contaminantes orgánicos e inorgánicos. Para abordar este problema, una tecnología basada en plantas, denominada fitorremediación es utilizada para descontaminar las tierras. La fitorremediación está basada en varios procesos como la fitodegradación, fitovolatilización, fitoacumulación y fitoextracción. Estos métodos son eficientes, económicos y respetuosos del ambiente (3).

La fitorremediación puede combinarse con otras técnicas que favorezcan expresar mejor el potencial de las plantas en revitalizar el ecosistema de suelos contaminados. La remediación de suelos contaminados que integra plantas y microorganismos como bacterias y hongos en interacción ofrecen herramientas efectivas para asistir a la fitorremediación. No solo se promueve el crecimiento de la planta, sino que también disminuye la toxicidad de los metales y degrada compuestos orgánicos persistentes (4).

El presente trabajo consta de cuatro capítulos, el Capítulo I, sobre Planteamiento del Estudio, incluye planteamiento y formulación del problema, objetivos, justificación e importancia, hipótesis y descripción de variables. El Capítulo II, del Marco Teórico, incluye los antecedentes del problema, nacionales e internacionales, las bases teóricas y la definición de términos básicos. El Capítulo III, sobre la Metodología, incluye el método y alcance de la

investigación, tipo, nivel y diseño de la investigación, población y muestra, técnicas e instrumentos de recolección de datos. El Capítulo IV, de los Resultados y Discusión, incluye los resultados del tratamiento y análisis de la información para las variables evaluadas de planta y suelo; así como, la contrastación de las hipótesis y la discusión de resultados. Se incluye en el documento las conclusiones, recomendaciones y referencias.

## **CAPÍTULO I**

### **PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO**

#### **1.1. Planteamiento y formulación del problema**

##### **1.1.1. Planteamiento del problema**

La contaminación del suelo por metales pesados tiene un efecto dañino sobre los sistemas biológicos y no experimentan biodegradación. Los metales pesados tóxicos tales como plomo, cobalto y cadmio pueden ser diferenciados de otros contaminantes, ya que no pueden ser biodegradados, pero pueden ser acumulados en los organismos vivos, causando así desórdenes en concentraciones relativamente bajas (5).

Los suelos contaminados también impactan la calidad de los alimentos y nutrientes de la biota animal y humana. Con el fin de abordar este problema, la fitorremediación, una tecnología basada en plantas es utilizada para descontaminar los suelos. La fitorremediación está basada en varios procesos como la fitodegradación, la fitovolatilización, la fitoacumulación y la fitoextracción. Estos métodos son eficientes, no alteran el ambiente y son económicos (6).

Varios enfoques están disponibles para la remediación de suelos contaminados con cadmio. Una de ellas, la tecnología de fitorremediación se refiere a la técnica de usar plantas para transferir los metales pesados en el suelo a los tejidos aéreos y, por lo tanto, reducir el contenido de metales pesados en el suelo (7). Aunque se han documentado muchas especies fitorremediadoras, sus hábitos de lento crecimiento, rendimientos bajos de biomasa, unidos al amplio rango de eficiencias de remoción son limitaciones para una fitorremediación natural. Consecuentemente, una

fitorremediación asistida que involucra aditivos químicos, microorganismos y prácticas agronómicas modificadas se constituye en una tendencia en la tecnología de fitorremediación (8).

En este sentido, la prevención de la contaminación del ambiente (suelo, agua y aire) y su recuperación es una prioridad. En el campo de la biología del suelo, como rama de la ciencia del suelo, se presenta un enorme potencial de los microorganismos del suelo, en el mejoramiento de la calidad del suelo, degradación e inmovilización de contaminantes; así como, su efecto en el crecimiento y en la protección de las plantas frente a diferentes factores. Como resultado, se incrementa el interés por la aplicación de los microorganismos en diferentes áreas. Dentro de los métodos biológicos de recuperación de suelos contaminados por metales pesados, metaloides y otros contaminantes, el uso de plantas y microorganismos rizosféricos representa una alternativa de bajo costo y con enormes ventajas ambientales (9).

Este enfoque de la fitorremediación ha recorrido un largo camino en corto tiempo, principalmente en investigaciones en condiciones controladas de laboratorio, buscando estrategias como parte de un esfuerzo para hacer más eficaz esta tecnología; por lo que se propone el uso de microorganismos junto con plantas para descontaminar los suelos. Estos microorganismos incluyen bacterias biodegradativas, promotoras de crecimiento de plantas y bacterias que facilitan la fitorremediación (10).

### **1.1.2. Formulación del problema**

#### **1.1.2.1. Problema general**

¿Cuál es el efecto de la aplicación de microorganismos eficientes en la fitorremediación de cadmio por *Zea mays* L. en un suelo contaminado de Sincos, Jauja?

#### **1.1.2.2. Problemas específicos**

- A. ¿Qué efecto tienen las concentraciones crecientes de microorganismos eficientes en los indicadores de fitorremediación: ¿factor de bioconcentración y factor de traslocación, en *Zea mays* L.?
  
- C. ¿Qué efecto tienen las concentraciones crecientes de microorganismos eficientes en el crecimiento de *Zea mays* L.: altura de planta, longitud de raíz, materia seca aérea y radicular?

B. ¿Cuál es el efecto de las concentraciones crecientes de microorganismos eficientes en la concentración de cadmio en el suelo contaminado de Sincos?

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. General**

Determinar el efecto de la aplicación de microorganismos eficientes en la fitorremediación de cadmio por *Zea mays* L. en un suelo contaminado de Sincos, Jauja.

### **1.2.2. Específicos**

- Determinar el efecto de concentraciones crecientes de microorganismos eficientes en los indicadores de fitorremediación: factor de bioconcentración y factor de translocación en *Zea mays* L.
- Cuantificar el efecto de concentraciones crecientes de microorganismos eficientes en el crecimiento de *Zea mays* L.: altura de planta, longitud de raíz, materia seca aérea y radicular.
- Determinar el efecto de concentraciones crecientes de microorganismos eficientes en el contenido de Cd en un suelo contaminado de Sincos.

### **1.2.3. Justificación e importancia**

#### **1.2.4. Justificación teórica**

En un suelo contaminado con cadmio la biota del suelo es disminuida en su población debido a la toxicidad de este metal pesado. Una alternativa a este efecto negativo es el incremento de la vida del suelo a través de la aplicación de microorganismos eficientes para favorecer la actividad microbial, descomponer la materia orgánica y favorecer la retención o complejación de los metales pesados para disminuir la concentración de cadmio en el suelo, incrementar el crecimiento de las plantas y contribuir a la remediación del suelo.

La retención o complejación de metales pesados en los suelos se debe al incremento del contenido de materia orgánica descompuesta, que presenta mayor número de cargas eléctricas superficiales comparado por ejemplo a las arcillas. Este proceso inmoviliza el cadmio y la planta ya no lo absorbe.

### **1.2.5. Justificación metodológica**

La aplicación de microorganismos eficaces a suelos contaminados requiere utilizar dosis que sean eficientes en incrementar la vida en el suelo, utilizando como indicadores la disminución de contaminación o remediación del suelo, así como, el incremento del crecimiento de la planta (altura, materia seca, longitud de raíz).

Los productos comerciales de microorganismos eficaces, además de su activación requieren ensayos de dosificación para evaluar su efecto en un suelo contaminado, debido a que las características de un suelo difieren de otro tanto en sus propiedades químicas, físicas o biológicas.

### **1.2.6. Justificación ambiental**

La remediación del suelo es una necesidad debido al incremento de la contaminación, especialmente de fuentes antropogénicas, como son principalmente el uso de agroquímicos, y vertimiento de residuos industriales y municipales a suelos agrícolas. Una de las alternativas es el uso de técnicas y productos que no alteren el ambiente, como lo es la remediación biológica; esto incrementará la biodiversidad en el suelo y la actividad de los microorganismos, así como, su interacción con las plantas, que ocasionará una menor absorción de contaminantes por las raíces y lograr un desarrollo favorable de los vegetales para el consumo de sus productos por humanos y animales.

### **1.2.7. Justificación práctica**

La fitorremediación aplicada a suelos contaminados por metales pesados utiliza plantas que extraen estos contaminantes inorgánicos del suelo y los transfieren a los diferentes órganos vegetales para su almacenamiento, retención o complejación, por lo que en la medida que se incremente la información de las especies que tienen esta capacidad, ayudadas con el incremento o inoculación de microorganismos, que favorecen la vida microbiana en el suelo, mejoran las propiedades del suelo y consecuentemente el crecimiento de la planta, se podrá plantear alternativas para la aplicación de mezclas de tipos de microorganismos que se conviertan en herramientas auxiliares para hacer más efectiva la fitorremediación.

### **1.2.8. Importancia**

La fitorremediación es una tecnología cuyos avances ya tienen logros significativos, pero hace falta precisión en la información de los diferentes microorganismos que asisten a la transferencia de contaminantes del suelo a la planta, de como, por ejemplo, las diferentes bacterias

contribuyen a la fitorremediación de contaminantes inorgánicos, lo cual depende de varios factores, como la presencia de materia orgánica en el suelo, el tipo y la cantidad de microorganismos inoculados, el tipo de suelo contaminado; que influirán en la disponibilidad de metales para hacer eficaz la fitorremediación por *Zea mays* L. De esa manera se contribuirá a incrementar la información experimental para orientar la aplicación de fitorremediación con microorganismos *in situ*, que es un proceso reproducible, pero dependiente de otros procesos.

### **1.3. Hipótesis y descripción de variables**

#### **1.3.1. Hipótesis**

##### **1.3.1.1. General**

Ho: La aplicación de ME no incrementa significativamente la fitorremediación de Cd y no reduce la concentración en el suelo.

Ha: La aplicación de ME incrementa significativamente la fitorremediación de Cd y reduce la concentración en el suelo.

##### **1.3.1.2. Específicas**

A. Ho: Las concentraciones crecientes de microorganismos eficientes no afectan los indicadores de fitorremediación de Cd: factor de biocentración y factor de traslocación en *Zea mays* L.

Ha: Las concentraciones crecientes de microorganismos eficientes afectan significativamente a los indicadores de fitorremediación de Cd: factor de biocentración y factor de traslocación en *Zea mays* L.

B. Ho: Las concentraciones crecientes de microorganismos eficientes no afectan el crecimiento de *Zea mays* L.: altura de planta, longitud de raíz, materia seca aérea y radicular.

Ha: Las concentraciones crecientes de microorganismos eficientes afectan significativamente el crecimiento de *Zea mays* L.: altura de planta, longitud de raíz, materia seca aérea y radicular

C. Ho: La aplicación de concentraciones crecientes de microorganismos eficientes no afecta la concentración de cadmio en el suelo.

Ha: La aplicación de concentraciones crecientes de microorganismos eficientes afecta significativamente la concentración de cadmio en el suelo

### **1.3.2. Descripción de variables**

#### **Variable independiente (X):**

Microorganismos eficaces

Indicadores:

D. Concentraciones de microorganismos eficientes

#### **Variable dependiente (Y):**

Fitorremediación

Indicadores:

E. Factor de bioconcentración en raíz (FBR)

F. Factor de bioconcentración en hoja (FBH)

G. Factor de translocación (FT)

H. Materia seca aérea y radicular

I. Altura de planta y longitud de raíz

J. Concentración de cadmio en el suelo

**Tabla 1. Operacionalización de variables**

Variables	Definición conceptual	Dimensiones	Indicadores
X = microorganismos eficientes	Los microorganismos eficientes son una mezcla de microorganismos benéficos (bacterias ácido lácticas y fotosintéticas, levaduras, actinomicetos y hongos fermentativos) que se aplican al suelo como inoculantes para incrementar la diversidad microbial en el suelo (11).	%	Concentración de microorganismos eficientes
Y1 = Fitorremediación	La fitorremediación es una tecnología basada en plantas utilizada para suelos contaminados. Incluye los procesos de fitodegradación, fitovolatilización, fitoacumulación y fitoextracción. Son métodos eficientes, económicos y no alteran el ambiente (12).	Relación	Factor de bioconcentración en hojas Factor de bioconcentración en raíz Factor de bioconcentración total Factor de traslocación
Y2 = Crecimiento <i>Zea mays</i> L.	El crecimiento se refiere a la acumulación de biomasa y puede ser medida por área foliar, peso de raíz, tallo total, o altura de planta, y puede ser usado para comparar dentro y entre cultivares (13).	cm  g	Altura de planta Longitud de raíz Materia seca aérea Materia seca radicular
Y3 = Cadmio en el suelo	Metal pesado presente en el suelo, disponible para las plantas en sitios contaminados cuya transferencia a los seres vivos causa toxicidad (14).	mg.kg <sup>-1</sup>	Cd total en suelo

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1. Antecedentes del problema

##### 2.1.1. Nacionales

En el trabajo de investigación «Eficiencia de los microorganismos efectivos (EM) y *bokashi* en la recuperación de suelos contaminados con glifosato», se tuvo como objetivos: (i) verificar los efectos de microorganismos efectivos y *bokashi* sobre el rendimiento, calidad y producción de rabanito, y (ii) determinar la eficiencia de los EM y *bokashi* en la recuperación de suelos contaminados con glifosato en función de la aparición de malezas. El experimento se instaló en el campo experimental de Fitogenética de la Universidad Nacional de Trujillo. Estuvo constituido por tres tratamientos EM + *Bokashi*, herbicida + EM + *Bokashi*, herbicida y un control, dispuestos en un diseño completamente aleatorizado, con cuatro repeticiones. Los resultados mostrados en los diferentes tratamientos permitieron evaluar tanto la reducción de la contaminación del suelo por la desaparición de 14 % de malezas, como la calidad y producción de rabanito. Se concluyó que el tratamiento EM + *Bokashi* obtuvo las mejores respuestas en términos de peso/planta, 57.516 g/planta, respecto a herbicida + EM + *bokashi* con 42,516 g/planta, herbicida con 28.92 g/planta y testigo con 42.012 g/planta (15).

En el trabajo de investigación «Efecto de la aplicación de microorganismos eficaces (EM) en suelos contaminados por lixiviados del botadero municipal de Pucallpa, departamento de Ucayali», se recolectaron 120 kg de muestra total de suelo para hacer una investigación aplicada, experimental, descriptiva y explicativa. El suelo extraído fue dispuesto en 12 bandejas, cada una de 10 kg, donde se aplicaron las dosis de EM, en un diseño completamente al azar con 4 tratamientos y tres repeticiones. La muestra de suelo fue analizada al inicio, 30 días después de la instalación y a los 60 días después de la instalación, en los parámetros:

materia orgánica (MO), pH, nitrógeno total (Nt), fósforo (P), capacidad de intercambio catiónico (CIC), plomo (Pb) y cadmio (Cd). Los resultados mostraron que la MO, pH, Nt, P y CIC se incrementaron en el tratamiento 4 (dosis más alta), y el Pb y Cd disminuyeron a valores inferiores al ECA de suelos (16).

En el trabajo de investigación «Microorganismos eficientes (EM) en la recuperación de un suelo contaminado con cadmio del distrito de San Jerónimo, Cusco», tuvo como objetivo evaluar el efecto de los EM en las propiedades fisicoquímicas y contenido de cadmio de un suelo contaminado. El tipo de investigación fue aplicado, enfoque cuantitativo, y el diseño fue experimental. Los tratamientos de 200 mg de muestra de suelo con 0 %, 5 %, 10 %, 15 % y 20 % de EM, fueron dispuestos en un diseño completamente al azar, con 5 tratamientos y tres repeticiones, durante ocho semanas. Los resultados mostraron que la aplicación de EM mejoró significativamente las propiedades fisicoquímicas del suelo contaminado, pero el cadmio tuvo una reducción no significativa (17).

En el trabajo de investigación «Efecto de microorganismos eficaces y vermicompost en la fitorremediación por *Sonchus arvensis* en un suelo contaminado del distrito de Sincos, Junín, 2021», se utilizaron tres niveles porcentuales de ME y vermicompost (VC): 0, 5 y 10, solos y en combinación, dispuestos en un diseño completamente al azar con arreglo factorial 3 x 3, utilizando baldes plásticos con una masa de suelo contaminado de 4 kg bajo cobertor rústico. El VC se aplicó al inicio del experimento y los ME después de 15 días del trasplante de la especie evaluada, por un periodo de 4 semanas. Se evaluó Cd y Pb total en la parte aérea y radicular de *S. arvensis*, así como, en el suelo de cada unidad experimental al final del periodo de investigación. Estos datos permitieron calcular el factor de traslocación (FT) y factor de bioconcentración (FBC). Los resultados mostraron que el VC redujo significativamente el Cd en la parte aérea y raíz, pero se incrementó con ME10 y control. El contenido de Pb en la raíz fue favorecido por ME10. El FT de Cd fue superior con ME10+VC0. El FBC de Cd en hojas y total fue mayor con ME10 y VC0. Se evidenció que *S. Arvensis* es fitoextractor de Cd pero no de Pb. El tratamiento ME10 incrementó significativamente el Cd en suelo y disminuyó Pb total (18).

En el trabajo de investigación «Efecto de la aplicación de microorganismos eficaces en el contenido de cadmio y propiedades fisicoquímicas de un suelo contaminado del distrito de Orcotuna, Concepción, 2017», se utilizó suelo agrícola de la capa arable de una parcela contaminada de Orcotuna en una cantidad de 5 kg, el cual fue distribuido en tratamientos de 0, 5, 10, 15 y 20 % de EM mediante la técnica de incubación, durante ocho semanas, dispuestos en un diseño completamente al azar. Los resultados indicaron que no hubo una disminución

significativa de Cd en el suelo. El pH del suelo, la conductividad eléctrica, la materia orgánica, el fósforo disponible, el potasio disponible, y la capacidad de intercambio catiónico, se incrementaron significativamente en el suelo (19).

### 2.1.2. Internacionales

En el trabajo de investigación «Effect of microbial inoculation and EDTA on the uptake and translocation of heavy metal by corn and sunflower», mediante un experimento de invernadero, se estudió el efecto de la inoculación microbiana y EDTA como quelato sintético sobre la absorción y translocación de metales pesados (Zn, Cu, Pb y Cd) por maíz (*Zea mays*) y girasol (*Helianthus annuus*) creciendo en suelos contaminados. Se desarrollaron cuatro tratamientos: el control, quelato sintético EDTA, inoculación con hongos micorrízicos arbusculares y la inoculación con hongos. La inoculación microbiana incrementó la biomasa de *Zea mays* y el EDTA disminuyó la biomasa de girasol. Los resultados también mostraron que el EDTA fue más efectivo que la inoculación microbiana en incrementar las concentraciones de todos los metales en las plantas. Generalmente, hubo diferencias significativas entre los tratamientos en la mayoría de los metales absorbidos, especialmente en maíz, con el siguiente orden: hongos micorrízicos arbusculares > hongos > EDTA > control, excepto para plomo. Se halló que la eficiencia de EDTA incrementó la absorción de plomo mayor que los tratamientos con inoculación microbiana. Los tratamientos más efectivos en estimular la translocación de los metales estudiados de las raíces a los tallos fueron EDTA u hongos micorrízicos arbusculares. La absorción máxima de metales y las eficiencias de fitoextracción fueron pronunciadas para maíz con hongos micorrízicos arbusculares para zinc, cobre y cadmio. Sin embargo, la absorción de metales pesados no fue suficientemente alta para alcanzar las tasas de extracción que serían necesarias para uso práctico (20).

En el trabajo de investigación «Cadmium and lead accumulation and distribution in the organs on nine crops: implications for phytoremediation», se condujo un experimento de campo en la Estación de Investigación de la Academia Agrícola, en Kraków, Polonia, durante 1999 y 2001, en un suelo Eutric Cambisol conteniendo 1.8 mg Cd/kg y 22 mg Pb/kg. Los cultivos seleccionados fueron: *Beta vulgaris* L., *Cucurbita pepo* L., *Cichorium intybus*, *Phaseolus vulgaris* L., *Hordeum vulgare* L., *Brassica oleracea* var. Capitata L., *Zea mays* L., *Medicago sativa* L. y *Pastinaca sativa* L. Los resultados mostraron que *Beta vulgaris* estuvo caracterizada por la más alta relación de concentración de cadmio (tallos/raíces). *Beta vulgaris* y *Pastinaca sativa* L. tuvieron la más alta tasa de concentración de plomo (tallos/raíces). La eficiencia de fitorremediación de los cultivos investigados dependió de la producción de biomasa y la posibilidad de acumulación de metales en los órganos cosechables (21).

En el trabajo de investigación «Phytoremediation potential of two maize varieties cultivated on metal-particulate-contaminated soil», se sembraron dos variedades de maíz [ART98/SW1 (proteína) y BR-9928-DMR-SR-Y (no protéico)] dentro del área de una planta de reciclaje de metales en Ile – Ile, Nigeria para evaluar el potencial de remoción de metales de estos cultivares de maíz. El experimento se condujo en dos localidades, cada una para una variedad de maíz dispuestos en un diseño de bloques completamente randomizados. Como enmiendas del suelo se utilizó dos tipos de biochar producidos de rastrojos de maíz y *Milicia exelsa* a una dosis de 10 t/ha. La absorción de metales por las dos variedades de maíz fue en el siguiente orden: raíz > tallo > grano, teniendo el maíz protéico altos factores de bioconcentración: Fe 86.82, Zn 1.19, Cu 4.53, Mn 2.42 y Pb 0.15, y por lo tanto es un camino a través de los cuales los animales, incluyendo los humanos podrían ingerir estos metales. Se concluyó que el cultivo de maíz es un bioacumulador de metales en el suelo, y el cultivar de maíz protéico remueve más metales que el maíz no protéico (22).

En el trabajo de investigación «Phytoremediation of soils polluted with heavy metals in the vicinity of the Zenica Steel Mill in Bosnia and Herzegovina: potential for using native flora», se estudió los niveles de contaminación del suelo y estimados de potencial de fitorremediación de siete plantas nativas que crecían cerca de la planta de acero de Zenica. Se muestrearon hojas de plantas o raíces y muestras de suelo asociadas y fueron caracterizadas en términos de concentraciones de los metales pesados cromo, cadmio, plomo, zinc, cobre y níquel. Las concentraciones de los metales pesados en las muestras de suelo y plantas fueron medidas usando espectrofotometría de absorción atómica. También se calcularon los factores de bioacumulación para los metales pesados. Todas las plantas estudiadas tuvieron una baja habilidad para remover o estabilizar metales pesados en el suelo. Esto estuvo probablemente asociado con la pobre movilidad y también pobre disponibilidad de los metales pesados para el crecimiento de las plantas en la cercanía a esta planta de procesamiento de acero (23).

En el trabajo de investigación «The study of bacteria populations in Phytoremediation of cadmium using *Eichhornia crassipes*» se tuvo como objetivo analizar la población de bacterias en la fitorremediación de cadmio utilizando *E. crassipes*. Los tratamientos en el estudio incluyeron T1 de 3 mg/L, T2 de 7 mg/L y T3 de 9 mg/L. Los parámetros observados fueron concentración de cadmio, número total de bacterias, cambio en pH y sólidos suspendidos totales. Basados en los resultados del estudio, el tratamiento T1 fue el que mejor absorbió Cd (82 %). Este tratamiento fue el más alto comparado a los tratamientos T2 de 65 % y T3 de 73 %. La más alta población de bacterias fue en el tratamiento T1. Para pH y sólidos suspendidos totales, a los doce días todos los tratamientos fueron similares. Esto muestra que

*E. crassipes* se inhibirá de absorber Cd cuando este elemento se encuentra a altas concentraciones, afectando también el crecimiento de las bacterias (24).

En el artículo de investigación «Effective microorganisms as remediation for marginal soil in the Philippines», se reporta la utilización de aminoácidos de pescado, suero de ácido láctico de bacterias, y microorganismos eficaces (ME) comerciales, aplicados a suelos marginales semanalmente por 10 semanas, con el objetivo de observar los cambios en el suelo. Las propiedades físicas y químicas fueron analizadas antes y después de la aplicación de los tratamientos. Los resultados revelaron que hubo un cambio en las propiedades físicas y químicas, seleccionadas, en el suelo. La textura cambió de ligera a media en todos los tratamientos. Los más altos incrementos de pH (5.4 %), contenido de materia orgánica (200 %) y contenido de P (115.7 %) se notó en el tratamiento de aminoácido de pescado.; mientras que los más altos incrementos de conductividad eléctrica (514.3 %) y contenido de potasio (89.1 %) se observó en los ME comerciales. Los EM fueron utilizados para remediar problemas del suelo con relación al mejoramiento de la textura del suelo, conductividad eléctrica, materia orgánica, y contenido de fósforo (25).

En el artículo de investigación «Potential mechanisms contributing to the high cadmium removal efficiency from contaminated soil by using effective microorganisms as novel electrolyte in electrokinetic remediation applications», se ensayó la habilidad de una solución de microorganismos efectivos (ME) para remover cadmio (Cd) del suelo. Los resultados experimentales revelaron que los ME tuvieron una eficiencia de remoción de Cd total de 90.5 % después de 7 días de tratamiento electrocinético (EC). Durante el tratamiento EC, los ME exhibieron un pH inicial de 3.6 y una conductividad de 7 mS/m; por lo tanto; ellos disminuyeron el pH del ánodo después que el campo eléctrico fue aplicado. Los ME tuvieron una tensión superficial de 50.3 dinas/cm y exhibieron propiedades biosurfactantes en los experimentos de EC. La eficiencia de remoción de Cd de los ME fue comparada con el agua de caño, ácido cítrico, y ácido etilendiaminotetraacético (EDTA). Los resultados revelaron que después de 7 días de tratamiento, los ME tuvieron la más alta eficiencia de remoción de Cd que el ácido cítrico (72.3 %), EDTA (75.4 %), y agua de caño (21.7 %). Los resultados pueden ser parcialmente atribuidos a la propiedad biosurfactante de los ME, que los favorece para penetrar profundamente en la matrix del suelo y disolver alta cantidad de contaminantes (26).

En el trabajo de investigación «Microorganisms for Bioremediation of soils contaminated with heavy metals», se tuvo como objetivo crear un consorcio basado en microorganismos aislados de sitios tecnogénicos para su posterior desarrollo en el campo de la restauración del suelo en agricultura. En este estudio, se seleccionaron las cepas promisorias de

*Pantoea* sp., *Achromobacter denitrificans*, *Klebsiella oxytoca*, *Rhizobium radiobacter*, y *Pseudomonas fluorescens*. Los más efectivos fueron Consortium D, que incluyó *Achromobacter denitrificans*, *Klebsiella oxytoca*, y *Rhizobium radiobacter*, en una relación 1:1:2, respectivamente. La habilidad para producir ácido indolacético y ácido butírico, fue de 18.03 µg/L y 2.02 µg/L, respectivamente; la capacidad de absorción de metales pesados del medio experimental fue Cd: 56.39 mg/L, Hg: 58.03 mg/L, As: 61.67 mg/L, Pb: 91.13 mg/L y Ni: 98.22 mg/L. Además, el uso combinado de *Trifolium pratense* L. y el consorcio desarrollado aseguró la remoción de casi 32 % Pb, 15 % As, 13 % Hg, 31 % Ni, y 25 % Cd del suelo (27).

En el artículo de investigación «Characterization of heavy metal toxicity in some plants and microorganisms – A preliminary approach for environmental bioremediation», se examinó los efectos fitotóxicos del Cr(VI) y Cd(II) sobre germinación de la semilla y crecimiento de *Lepidium sativum* a diferentes concentraciones (30 – 300 mg/L) en soluciones iónicas simples. Los estudios también direccionaron la ecotoxicidad de iones metálicos sobre *Azotobacter chroococcum* y *Pichia* sp. aislados del suelo. El crecimiento microbial fue estimado por peso de la biomasa seca y determinación la actividad enzimática de dehidrogenasa y catalasa. Los resultados mostraron que el Cr(VI) y Cd(II) puede inhibir la germinación de *L. sativum* y desarrollo de la raíz, dependiendo del ion metálico y su concentración. El efecto fitotóxico de los metales pesados fue también confirmado por la cantidad disminuida de biomasa seca. El ensayo de toxicidad demostró el efecto adverso de Cr(VI) y Cd(II) sobre el crecimiento de *Azotobacter* sp. y *Pichia* sp., manifestado por la disminución de biomasa en más del 50 % a concentraciones de metales entre 150 – 300 mg/L (28).

## **2.2. Bases teóricas**

### **2.2.1. El cadmio (Cd) en el suelo**

#### **2.2.1.1. Toxicidad del Cd**

El Cd es uno de los elementos más móviles y tóxicos en el ambiente (29). Puede reemplazar al calcio en los minerales debido a su similar radio iónico, carga idéntica y similar comportamiento químico (30). A diferencia de otros elementos tóxicos tales como mercurio (Hg) y arsénico (As), al Cd ingresa a la dieta humana principalmente a través de vías terrestres, es decir, a través de hortalizas. En áreas con elevada concentración de Cd geogénica y antropogénica en suelo y agua, el Cd es bioacumulado en el arroz, conduciendo a una elevada absorción diaria de Cd en China, Korea y Jamaica (31).

Sin embargo, la disponibilidad de Cd es compleja, por ejemplo, el arroz de la parte sureste de China contiene más Cd que el arroz de la parte noreste. Las posibles razones son los suelos ácidos, un sobreuso de fertilizantes nitrogenados, contaminación a través de la irrigación

y deposición atmosférica, y el cultivo de arroz con una alta afinidad de acumulación de Cd en el sureste de China (32).

El envenenamiento crónico del Cd, denominado *itai-itai* fue primero descubierto en Japón a inicios del siglo 20, causa disfunción renal, osteomalacia, y osteoporosis debido a la competencia con el calcio y otros nutrientes. La exposición del Cd está también asociada a desórdenes del metabolismo de la glucosa, cáncer a la mama y al pulmón, infarto cerebral e insuficiencia cardíaca (33).

#### **2.2.1.2. Contenido de Cd en el suelo**

La concentración de Cd en un suelo dado está generalmente relacionado a su abundancia en el material parental. Su cantidad resulta de las entradas a través de la deposición atmosférica, actividad industrial o agrícola, menos las salidas en forma de lixiviación, erosión y cosecha de los cultivos (34).

En suelos no contaminados a nivel mundial, la abundancia promedio de Cd es 0.36 mg/kg, aunque los valores pueden variar entre continentes, países y tipos de suelo. Por ejemplo, las concentraciones promedio son: 0.27 mg/kg en USA (N = 3045), 0.01 mg/kg en Australia, 0.18 mg/kg en Brasil, 0.3 mg/kg en Japón, 0.2 mg/kg en Europa. En Europa, las concentraciones de Cd son 0.3 a 0.1 mg/kg en Alemania (N = 2947), 0.6 a 0.7 mg/kg en UK (N = 5692), y 0.5 mg/kg en los Países Bajos (N = 708) (35).

Dentro del *Soil taxonomy*, los suelos con altos contenidos de materia orgánica (Histosols) y los suelos de zonas áridas (Aridisols) tienen los más altos contenidos de mediana con 0.62 mg/kg y 0.3 mg/kg respectivamente, mientras que los fuertemente meteorizados, los Spodosols (0.2 mg/kg), Alfisols (0.11 mg/kg), y Ultisols (0.05 mg/kg) tienen los más bajos contenidos (36).

Los niveles de fondo del contenido geogénico de Cd en los suelos de Alemania fueron calculados como el percentil 90 dependiendo del uso de la tierra y génesis de la roca. Los niveles de Cd van de 0.06 mg/kg en subsuelos arenosos a 1.8 mg/kg en suelos de lugares pantanosos, 1.88 mg/kg en suelos sobre depósitos fluviales en lugares forestales, y 2.0 mg/kg en sedimentos en la zona intermareal. El contenido de cadmio en los suelos en general depende de la textura del suelo; contenidos elevados de Cd promedio pueden ser hallados en suelos con contenidos altos de arcilla y turba (37).

Los contenidos de Cd sobre 3 mg/kg generalmente se cree que indican suelos contaminados. Las gradientes de concentración en los suelos son comunes, donde el Cd se incrementa con la disminución de la distancia a instalaciones industriales, carreteras y áreas urbanas (38). Por ejemplo, se ha reportado que el contenido promedio de Cd en suelos franceses mostró un gradiente de antropización de concentraciones de Cd con respecto al uso de la tierra, es decir, forestal (0.13 mg/kg) < huertas y viñas (0.18 mg/kg) < pasturas (0.19 mg/kg) < suelos agrícolas (0.24 mg/kg) < jardines (0.34 mg/kg) < áreas urbanas, industriales, mineras y militares (1.30 mg/kg) (39).

Las concentraciones locales de Cd en el suelo por encima de 3 mg/kg se pueden encontrar sin factores antropogénicos de contaminación. Por ejemplo, en áreas forestadas, el contenido de Cd puede alcanzar los 10 mg/kg debido a fondo pedo-geoquímico (40), mientras la meteorización de fosforitas de depósitos de guano produjo contenidos de Cd sobre los 770 mg/kg en suelos de Jamaica (41).

Por ejemplo, en China, Corea, Finlandia, Suiza, y los Estados Unidos, las pizarras negras y suelos asociados muestran elevado contenido de Cd superior a 42 mg/kg. Además, la oxidación de materia orgánica y sulfuros en las pizarras negras causa drenaje ácido de la roca y favorece la movilidad del Cd (42).

El contenido elevado de Cd en suelos y sedimentos está generalmente unido a la abundancia de minerales de arcilla, carbonatos, materia orgánica, y óxidos hidratados, así como, ciertas condiciones fisicoquímicas, tales como elevado pH, y condiciones anóxicas. Mientras que el Cd está frecuentemente enlazado a las formas intercambiables menos estables, carbonatos e hidróxidos, otros metales pesados, tales como Pb y Cu, están fuertemente enlazados la fracción sulfídica y orgánica (43).

### **2.2.1.3. Fuentes antropogénicas de cadmio**

Las entradas antropogénicas de Cd al suelo son las emisiones de combustión, lodos de depuradora, rellenos sanitarios, tráfico vehicular, industria metálica, minería y accidentes. Similar al uranio (U), una razón común para las elevadas concentraciones de Cd en el suelo es el uso de fertilizantes fosfatados, los cuales contienen cadmio como impureza (44).

El principal uso del Cd en el mundo, y así, la fuente primaria de Cd dirigida a vertederos con residuos sólidos municipales, son las baterías de níquel – cadmio (45). Los residuos sólidos municipales en Europa tienen contenidos promedio de 0.3 a 12 mg/kg, y las concentraciones promedio en los lixiviados fueron estimadas como 0.5 a 3.4 mg/L (46). Adicionalmente, los

productos que contienen Cd son pigmentos, revestimientos y enchapados, estabilizadores para cloruro de polivinilo (PVC) y aleaciones (47).

El rango de contribución de las fuentes de contaminación a la cantidad de Cd presente en los suelos que está disponible para el lixiviado dentro de la capa freática es de 10 a 25 % del estiércol de ganado, 15 a 50 % de la deposición atmosférica, 30 a 55 % de los fertilizantes minerales y 2 a 5 % de lodos y compost (48). Además de las actividades antropogénicas, la variabilidad natural en las rocas y minerales puede ser una razón para la elevada concentración de Cd asociada a los suelos (49).

Los fertilizantes fosfatados contienen en promedio 77 mg Cd por kg de  $P_2O_5$  en los países del mediterráneo oriental (50), 36 mg Cd por kg  $P_2O_5$  en Europa (51) y 60 mg de Cd por kg de  $P_2O_5$  en Alemania (52).

La contaminación de cadmio en el suelo se ha observado en todo el mundo. Los principales grupos de contaminación son la industria minera, manejo de residuos, y áreas urbanas. Los casos de ejemplos seleccionados como localidades con niveles máximos de Cd dependen del tipo de contaminación. Por ejemplo, la contaminación de Cd del suelo de fundiciones de Zn, pueden ser causadas por la lixiviación de residuos sólidos (53), o por deposición atmosférica (54), causando concentraciones de Cd en el suelo de 344 mg/kg a 74 mg/kg, respectivamente.

#### **2.2.1.4. Reacciones del Cd en el suelo**

El Cd en la solución suelo generalmente se presenta como catión divalente (55). El pH influye la movilidad del Cd debido a la hidrólisis del metal, formación de par-iónico, solubilidad de la materia orgánica, carga superficial de óxidos hidratados, bordes de materia orgánica y arcilla. Conforme se incrementa el pH, la retención del metal a las superficies minerales, se incrementa mediante la adsorción y precipitación (43).

El cadmio preferencialmente permanece en solución a pH menor de 6.5 y en condiciones aireadas (56). El ion  $Cd^{+2}$  por sí mismo no es sensitivo al redox, pero está indirectamente unido a las condiciones redox debido a la formación de complejos acuosos sensitivos al redox, tales como  $CdHS^+$ , que se presenta en condiciones anóxicas y sulfúricas, y precipitados estables, tales como esfalerita ( $ZnS$ ), galena ( $PbS$ ), y calcopirita ( $CuFeS_2$ ), que puede contener Cd como un elemento traza (57).

La fracción de Cd móvil ambientalmente consiste en Cd soluble en agua, Cd no adsorbido específicamente, y complejos órgano metálicos (58). La fase adsorbida consiste en Cd enlazado a superficies minerales o débilmente enlazados como complejos órgano metálicos. Esta fracción es probablemente responsable para las fluctuaciones transitorias de concentraciones de Cd en la solución suelo. La fracción estable de Cd está asociada con la matrix del suelo o enlazada como complejos superficiales en óxidos e hidróxidos, silicatos, sulfuros, u otros minerales estables (59).

Además, el Cd es el único metal con afinidad para la fracción fácilmente solubilizada en protocolos típicos de extracción secuencial de fase sólida (60). Esta fracción incluye Cd soluble en agua, componentes solubles en ácido e intercambiables, y así, contenido de Cd disponible. Usualmente este Cd es introducido artificialmente vía deposición; mientras que el Cd originado de materiales geogénicos está típicamente presente en la fracción insoluble residual (42).

El Cd forma complejos solubles en agua con aniones, tales como  $\text{CdCl}^+$  o  $\text{CdSO}_4^0$ , pero también con materia orgánica disuelta (MOD) (58). Como resultado, el Cd puede permanecer en solución mientras que la sorción disminuye la concentración acuosa de otros metales pesados. Además, la complejación orgánica e inorgánica puede conducir a la disolución de Cd de oxi-hidróxidos, fosfatos, o sulfuros (61).

## **2.2.2. Los microorganismos eficientes**

### **2.2.2.1. Caracteres generales**

Los microorganismos han sido introducidos para describir el proceso de usar agentes biológicos para remover contaminación toxica de tierras agrícolas. Los microorganismos son las más efectivas herramientas de manejo para gestionar los ambientes contaminados y recuperar el suelo contaminado. Los residuos peligrosos generados de los procesos/operaciones químicas han sido tratados usando métodos biológicos. La contaminación del suelo tratada por cepas de microorganismos aislados *in situ*, es preferible a la tecnología metagenómica en el ambiente. A pesar de los actuales tratamientos tecnológicos, los contaminantes orgánicos son persistentes en el ambiente suelo-agua sobre sus niveles aceptables. Por lo tanto, los microorganismos benéficos son una tecnología innovativa que tiene el potencial de aliviar la contaminación tóxica (62).

Hoy en día, los microorganismos benéficos están teniendo amplia aplicabilidad. Un ejemplo son los microorganismos eficaces (ME) que todavía tienen su composición mantenida en secreto. Los ME son un producto en forma líquida, que consiste en una variedad no solo de

microorganismos efectivos y benéficos sino también algunos no patogénicos, con una admirable coexistencia entre tipos de microorganismos aerobios y anaerobios. Originalmente, los ME fueron fabricados para ser utilizados en agricultura orgánica, pero actualmente esta substancia está teniendo amplias aplicaciones en campos como la medicina, ambiente, sector pecuario, forestería, y agricultura (63).

Los microorganismos eficientes (ME) desde la década de los 80 gracias a las investigaciones del científico Teruo Higa, profesor de horticultura de la Universidad de Ryukyus en Okinawa, Japón, han demostrado ser una alternativa eficiente y sostenible en la producción de alimentos. Los ME agrupan una gran diversidad microbiana entre la cual se encuentran: bacterias ácido-lácticas, bacterias fotosintéticas, levaduras, actinomicetos y hongos filamentosos con capacidad fermentativa. Desde el punto de vista agrícola los ME promueven la germinación de las semillas, favorecen la floración, el crecimiento y desarrollo de los frutos y permiten una reproducción más exitosa en las plantas. Adicionalmente, se ha demostrado que mejoran la estructura física de los suelos, incrementan la fertilidad química, suprimen a varios agentes fitopatógenos causantes de numerosas enfermedades y descontaminan los suelos (64).

#### **2.2.2.2. Grupos microbianos de los ME**

Los grupos microbianos que componen los ME son cinco: a) bacterias ácido lácticas, b) bacterias fotosintéticas, c) levaduras, d) actinomicetes, e) hongos filamentosos con capacidad fermentativa (64).

##### **A. Bacterias ácido lácticas (BAL)**

Son microorganismos que tienen diversas aplicaciones, siendo una de las principales la fermentación de la leche, carne y vegetales para obtener productos como el yogur, quesos, encurtidos, embutidos, ensilados, bebidas y cervezas, entre otros (65).

Las BAL son cocos o bacilos Gram positivos, no esporulados, no móviles, anaeróbicos, microaerófilos o aerotolerantes; oxidasa, catalasa y bencidina negativas, carecen de citocromos, no reducen al nitrato a nitrito y producen ácido láctico como el único o principal producto de la fermentación de carbohidratos (66).

Además, las BAL son tolerantes a ácidos, por lo que algunas pueden crecer a valores de pH tan bajos como 3.2; otras a valores tan altos como 9.6; y la mayoría crece a pH entre 4 y 4.5. Estas características le permiten sobrevivir naturalmente en medios donde otras bacterias no lograrían sobrevivir (67).

Este grupo de bacterias incluye géneros como *Lactobacillus* (*L. plantarum*, *L. casei*), *Bifidobacterium*, *Lactococcus*, *Streptococcus* (*S. lactis*) y *Pediococcus*, que pueden ser aisladas a partir de alimentos fermentados, masas ácidas, bebidas, plantas y los tractos respiratorio, intestinal y vaginal de animales homeotérmicos, entre otros (64).

Las mismas pueden mostrar efecto antagónico frente a diferentes agentes fitopatógenos del suelo debido fundamentalmente a la disminución del pH, la producción de péptidos con actividad antimicrobiana como son bacteriosinas clase I y la nisina muy activa contra bacterias Gram positivas. Desde el punto de vista bioecológico estas bacterias son microaerófilas por ello se desarrollan bien en una atmósfera con 5 % de CO<sub>2</sub>. Son microorganismos de lento crecimiento muy dependiente de la temperatura, cuyo óptimo es de 30 °C (68).

#### B. Bacterias fotosintéticas

Son un grupo de microorganismos representados fundamentalmente por las especies *Rhodospseudomonas palustris* y *Rhodobacter sphaeroides*, microorganismos autótrofos facultativos. Este grupo utiliza como fuente de carbono moléculas orgánicas producidas por los exudados de las raíces de las plantas y como fuente de energía utilizan la luz solar y la energía calórica del suelo (69).

Entre las bacterias fotosintéticas que forman parte de los ME, *R. palustris* es una bacteria fototrófica facultativa clasificada como una bacteria púrpura. Esta especie es capaz de producir aminoácidos, ácidos orgánicos, hormonas, vitaminas y azúcares, que pueden ser utilizados por organismos heterótrofos para su crecimiento (69).

Dentro de las bacterias fotosintéticas, *R. sphaeroides* es una bacteria fotosintética facultativa y Gram negativa. Las células de esta bacteria pueden vivir tanto en agua dulce como en agua de mar, y formar una película rosada en la superficie de los estanques. Además de la actividad fotosintética, *R. sphaeroides* muestra gran diversidad metabólica que incluyen litotrofismo, respiración aeróbica, la fijación de nitrógeno y la síntesis de tetraploides, clorofilas, hemo y vitamina B12. Muchas cepas de *R. sphaeroides* poseen un flagelo ubicado en el costado del cuerpo celular, pero el flagelo es en realidad peritrico (70).

#### C. Levaduras

Las levaduras son un grupo microbiano presente en la preparación de ME capaces de utilizar diversas fuentes de carbono (glucosa, sacarosa, fructosa, galactosa, maltosa, suero hidrolizado y alcohol) y de energía. Varias especies del género *Saccharomyces* conforman esta comunidad microbiana, aunque prevalecen las especies *Saccharomyces cerevisiae* y *Candida*

*utilis*. Estos microorganismos requieren como fuente de nitrógeno al amoníaco, la urea o sales de amonio y mezcla de aminoácidos. No son capaces de asimilar nitratos ni nitritos (71).

Otros nutrientes requeridos por estos microorganismos es el fósforo que se puede administrar en forma de ácido fosfórico, magnesio (sulfato de magnesio), el calcio, el hierro, el cobre, el zinc, vitaminas del complejo B. Las levaduras sintetizan sustancias antimicrobianas a partir de azúcares y de aminoácidos secretados por bacterias fotosintéticas. Producen hormonas y enzimas que pueden ser utilizadas por las BAL. Como parte del metabolismo fermentativo producen etanol el cual en elevadas concentraciones puede tener actividad antifúngica (72).

*S. cerevisiae* es un eucariota unicelular, de forma globular y de color verde amarillento. Es un microorganismo quimiorganótrofo, ya que requiere de compuestos orgánicos como fuente de energía y no requiere de luz solar para crecer. Esta levadura es capaz de utilizar diferentes azúcares, siendo la glucosa la fuente de carbono preferida. Esta especie es anaeróbica facultativa, ya que es capaz de crecer en condiciones de deficiencia de oxígeno. Durante esta condición ambiental, la glucosa es convertida en diferentes intermediarios como etanol, CO<sub>2</sub> y glicerol. Esto último se conoce como fermentación alcohólica (70).

#### D. Actinomicetos

Los actinomicetos son bacterias filamentosas con cierta similitud con los hongos. El crecimiento consiste en un micelio ramificado que tiende a fragmentarse en elementos bacterianos. Muchos actinomicetos son de vida libre, particularmente en el suelo. Se destacan por su papel principal en la solubilización de la pared celular o componentes de las plantas, hongos e insectos. Por ello, tienen gran importancia en el compostaje y en la formación de suelos. Algunas especies de actinomicetos pueden ser endófitos en tejidos vegetales. Como componentes de ME *Streptomyces albus* y *S. griseus* son las principales especies de actinomicetos informadas (73).

Varias especies de actinomicetos principalmente las que pertenecen al género *Streptomyces*, son excelentes agentes de control biológico debido a su amplio repertorio para producir compuestos antifúngicos que inhiben el crecimiento micelial de varios hongos fitopatógenos. La actividad antagonista de *Streptomyces* contra hongos patógenos generalmente está relacionada con la producción de compuestos antifúngicos como: enzimas hidrolíticas extracelulares (quitinasas y  $\beta$ -1,3-glucanasa), se consideran enzimas hidrolíticas importantes en la lisis de las paredes celulares de *Fusarium oxysporum* Schtdl., *Sclerotinia minor* Jagger y *Sclerotium rolfsii* Sacc. (74).

## E. Hongos fermentadores

Los hongos contribuyen con los procesos de mineralización del carbono orgánico del suelo, además una gran cantidad de los hongos son antagonistas de especies fitopatógenas. Por otro lado, los hongos poseen la capacidad de reproducirse tanto sexual como asexualmente, en donde la segunda parte les permite multiplicarse de forma rápida bajo condiciones favorables (sustratos ácidos y ricos en carbono) y la sexual (esporas) es más común bajo condiciones desfavorables. Los hongos poseen requerimientos relativamente bajos de nitrógeno, lo cual les brinda una ventaja competitiva en la descomposición de materiales como la paja y la madera (75).

Dentro de los principales representantes de estos hongos se encuentran las siguientes especies: *Aspergillus oryzae* (Ahlburg) Cohn, *Penicillium* sp., *Trichoderma* sp. y *Mucor hiemalis* Wehmer. *A. oryzae* es un hongo microscópico, aeróbico y filamentoso. Esta especie ha sido utilizada milenariamente en la cocina china, japonesa y de otros países de Asia Oriental especialmente para fermentar soja y arroz, aunque también se reporta actividad celulolítica. Varias especies del género *Penicillium* son excelentes degradadores de lignina y celulosa, muy comunes en los ecosistemas tropicales por su capacidad de secretar enzimas extracelulares, su adaptación a ambientes ácidos y al estrés hídrico, así como, su rápido crecimiento (76).

Las especies pertenecientes al género *Trichoderma* sp. se caracterizan por ser hongos saprófitos, que sobreviven en suelos con diferentes cantidades de materia orgánica, los cuales son capaces de descomponerla y en determinadas condiciones pueden ser anaerobios facultativos, lo que les permite mostrar una mayor plasticidad ecológica. Las especies de *Trichoderma* se encuentran presentes en todas las latitudes, desde las zonas polares hasta la ecuatorial. Esta distribución tan amplia y su plasticidad ecológica están estrechamente relacionadas con la alta capacidad enzimática que poseen para degradar sustratos, un metabolismo versátil y resistencia a inhibidores microbianos. Las especies de *Trichoderma* pueden ejercer diferentes mecanismos biocontroladores como: competencia por espacio y nutrientes, el micoparasitismo, la antibiosis y la inducción de resistencia (77).

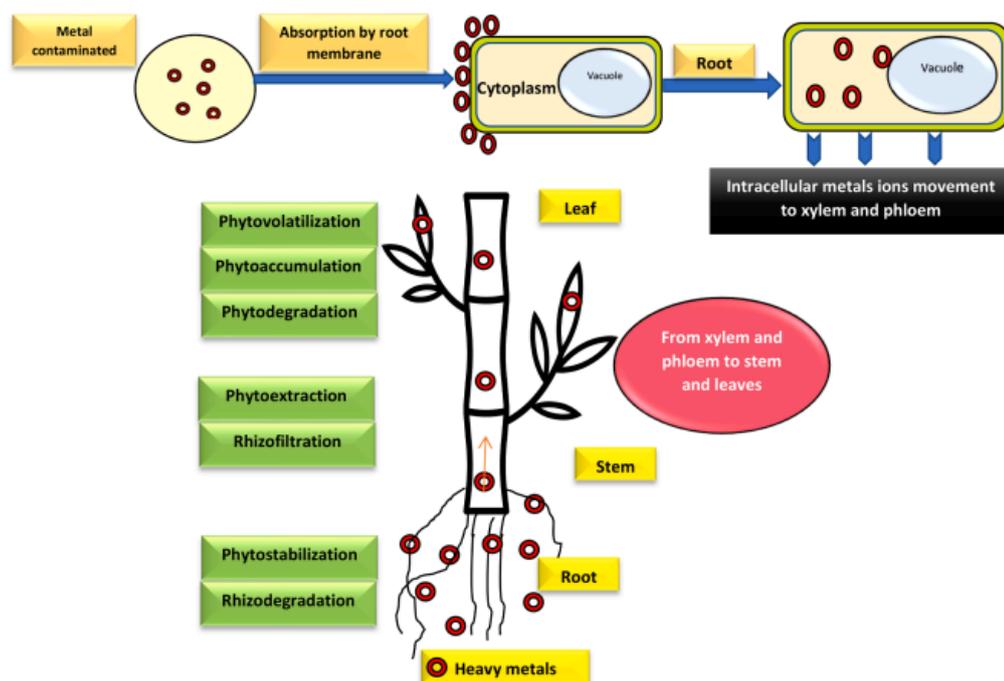
### **2.2.3. La fitorremediación**

#### **2.2.3.1. Características**

La técnica de fitorremediación es el uso de plantas para la restauración de áreas contaminadas, es una opción ambientalmente amigable estudiada en el campo y en experimentos de laboratorio. La realización de los procedimientos relativos al tipo de contaminación depende de una variedad de factores ambientales. La baja disponibilidad de agua en el suelo contribuye a la alteración del gradiente de potencial, disminución de la turgencia

celular, interrupción de la integridad de la membrana, y desnaturalización de las proteínas. La disponibilidad de elementos traza contaminantes del ecosistema para las plantas depende del valor del pH. El incremento de la salinidad disminuye el crecimiento de la planta. En el caso de la deficiencia de agua en la capa superficial del suelo, contribuye al incremento de la longitud de raíz y diámetro reducido, que reduce la absorción de agua. La actividad bacteriana, la disponibilidad de contaminantes, y factores ambientales como la temperatura, pH, ácidos orgánicos de bajo peso molecular, y ácidos húmicos pueden afectar la biorremediación de metales pesados (78).

Las técnicas de fitorremediación son una tecnología verde que consiste en detoxificar los suelos contaminados con metales, el agua, y la capa freática, utilizando diferentes tipos de procesos como la fitoextracción, fitoestabilización, fitovolatilización, rizofiltración, y fitofiltración (79). Muchas técnicas de fitorremediación involucran rizodegradación y fitodegradación, y son usadas para descomponer contaminantes orgánicos e inorgánicos (80).



**Figura 1. Estrategias de fitorremediación de metales de diferentes fuentes contaminadas y el movimiento de metales en células y tejidos de plantas vía xilema y floema (78)**

La fitorremediación es una tecnología desarrollada recientemente que disminuye o estabiliza metales pesados en el suelo usando plantas (75). Se define como plantas con habilidad para remover, estabilizar, degradar o aislar sustancias tóxicas del ambiente. Entre las diferentes técnicas de fitorremediación, la fitoextracción y la fitoestabilización son las más ampliamente usadas para la rehabilitación de suelos contaminados con metales pesados debido a que estas técnicas son de bajo costo, no alteran el ecosistema y son las más aceptables (81).

La fitoextracción es la absorción de metales pesados por las raíces seguido de su traslocación y acumulación en las partes aéreas de las plantas. Las plantas que producen altos niveles de biomasa y que crecen rápidamente, son fácilmente cultivadas y cosechadas, y acumulan altas concentraciones de metales pesados en las partes aéreas y son consideradas las más apropiadas para la fitoextracción (82).

La fitoestabilización es la habilidad de las plantas para disminuir la movilidad de metales pesados vía adsorción y acumulación por las raíces, adsorción sobre las raíces o cambiando la solubilidad de metales pesados por medio de exudados radiculares. Las plantas nativas que en suelos contaminados pueden retener grandes cantidades de iones metálicos en sus raíces o a través de exudados radiculares bajan su solubilidad, se consideran apropiadas para la fitoestabilización (83).

#### **2.2.3.2. Fitorremediación asistida por microorganismos**

Una alternativa para remover iones metálicos, es la tecnología que utiliza diversos agentes biológicos, primariamente bacterias, algas, levaduras, mohos, y plantas, lo cual atrae mayor atención actualmente (84).

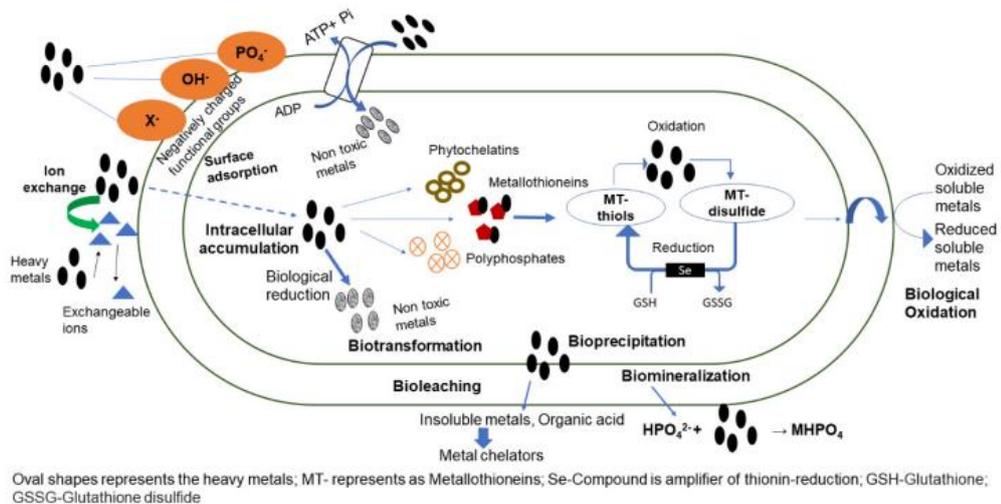
A diferencia de los métodos fisicoquímicos, los agentes biológicos son factibles económicamente y su ventaja reside en gran parte a su alta eficiencia de remoción de metales pesados, naturalmente rentables y de fácil disponibilidad. La utilización de agentes biológicos para remover compuestos tóxicos es denominada biorremediación. En el caso de la remoción de metales pesados, los procesos de biorremediación convierten metales pesados de alto nivel tóxico en iones menos tóxicos. Estos agentes biológicos tienen numerosos sitios de enlace con una gran relación de área superficial a su volumen y fuerte afinidad de enlace que ofrece alta eficiencia de remoción para metales pesados (85).

Estos agentes biológicos también exhiben propiedades naturales excepcionales tales como alta eficiencia fotosintética (restringido a plantas y microorganismos fotosintéticos) y una estructura para prosperar en entornos limitantes, tales como, contaminación de metales pesados, alta salinidad, deficiencias nutricionales, y temperaturas extremas. Las propiedades de agentes biológicos, las características del metal contaminante, el tipo de enlace involucrado en el secuestro de metales, parámetros operacionales (temperatura, pH, tiempo de contacto, concentración de iones metálicos y agentes biológicos), y las características de la solución con metales y la presencia de co-iones competitivos son los factores que gobiernan la eficiencia de los mecanismos de biorremediación. Estos caracteres intrínsecos permiten el uso de agentes biológicos en la remediación del suelo (84).

Aun cuando los metales pesados son típicamente tóxicos, los organismos han desarrollado mecanismos de resistencia específica y caminos intracelulares complejos para utilizar y detoxificar metales pesados para la reproducción celular (86).

Por ejemplo, pocas bacterias y cianobacterias han desarrollado mecanismos para sintetizar polisacáridos extracelulares, que fácilmente se enlazan a metales pesados y evitan que entren a las células. En otras bacterias, hongos y células de algas, los metales pesados fácilmente atraviesan la membrana extracelular y se acumulan en el citoplasma, donde ellos lo detoxifican con reacciones metabólicas intrínsecas o lo expulsan de las estructuras celulares a través de bombas iónicas (87).

Estos mecanismos son altamente influenciados por la naturaleza de los organismos y sus capacidades esenciales. Basados en estas capacidades, la biorremediación de metales pesados se alcanza a través de diferentes mecanismos, que no están limitados a la biosorción, bioacumulación, biorreducción, bioprecipitación, biovolatilización, biolixiviación, compostaje, cultivo de la tierra, biorreactores, biopilas y bioaspersión (88).



**Figura 2. Mecanismos de biorremediación de microorganismos (89)**

El mecanismo de biosorción es un proceso complicado en el cual los biosorbentes interactúan y adsorben los iones de los metales en el ambiente circundante. Como biosorbentes, diferentes recursos naturales son utilizados, tales como la biomasa de bacterias, hongos, algas, residuos agrícolas, plantas, y subproductos industriales. Usualmente, la biomasa muerta o células son utilizadas para la biosorción, que puede remover metales pesados contaminantes en rangos de concentraciones extremadamente bajas (partes por billón) con alta eficiencia. En algunos casos la biomasa celular viva es activamente utilizada para remover metales pesados vía biosorción (90).

Al margen de si es una biomasa viva o muerta, la biosorción es un fenómeno de superficie que permite la adsorción de metales pesados a la superficie celular. El mecanismo que caracteriza a la adsorción superficial es debido a la interacción física (electrostática o de Van der Waals), interacción química desplazamiento por intercambio iónico de cationes metálicos adsorbidos), complejación, difusión, o precipitación (91).

La superficie celular usualmente tiene una carga negativa que atrae fuertemente los metales pesados, mientras que, en algunos casos, esta superficie celular puede tener una capa de mucosa o polisacárido que adsorbe los metales pesados fuertemente a través de interacciones físicas. Los metales pesados son adsorbidos pasivamente sobre la superficie sin requerir gasto de energía hasta que alcanzan el equilibrio (92).

#### 2.2.4. El cultivo de maíz como fitorremediador

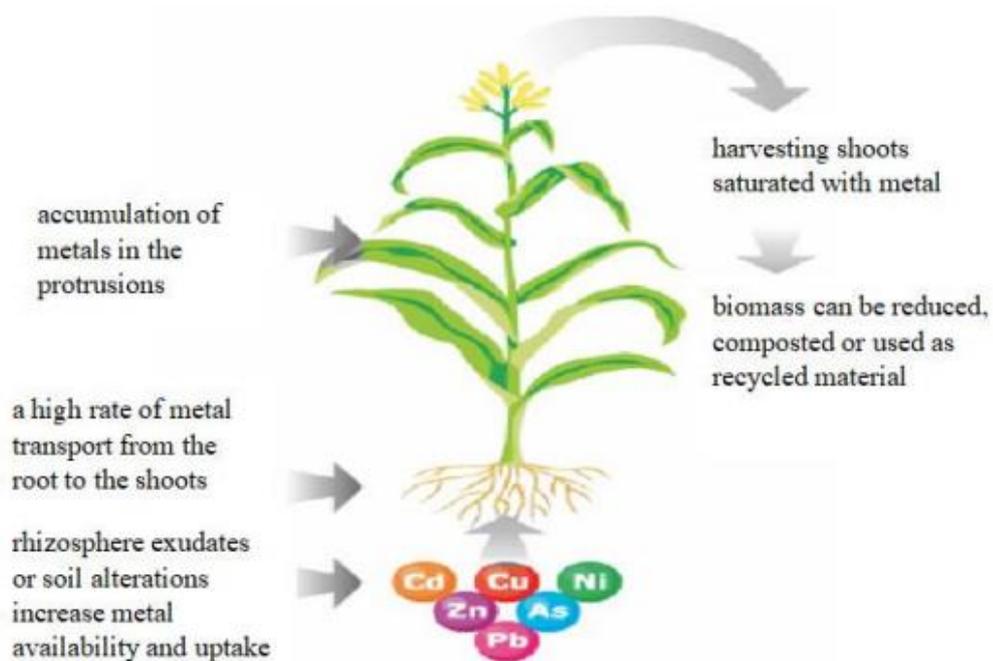


Figura 3. Representación esquemática de la fitoextracción de metales del suelo (93)

El maíz (*Zea mays* L.) es un género de la familia Poaceae, generalmente conocido como familia gramínea. «Zea» es derivado del nombre griego para gramíneas alimenticias. El género *Zea* tiene cuatro especies, la más económica significativamente ha sido *Zea Mays* L. que ha mostrado acumular cantidades significativas de metales pesados cuando es inducido por la acción de quelatos. El cultivo es tolerante a metales pesados, tiene una alta habilidad para acumular metales en las partes aéreas con un moderado factor de bioacumulación. Debido a

tales características, el maíz continuamente fitoextracta metales de suelos contaminados transportándolos a las raíces o tallos (94).

El principal mecanismo de remediación de metales pesados usando el maíz (*Zea mays* L.) está basado en la extracción de contaminantes del suelo (fitoextracción), seguido por la traslocación y acumulación de contaminantes en las partes aéreas de la planta. El análisis de los datos colectados y procesados han probado que el maíz tiene la habilidad de acumular Pb, Cd y Zn en sus tejidos (sistema radicular y tallos) dependiendo del tipo de metal y la concentración presente en la solución suelo. La acumulación de metales pesados y su distribución depende del tipo de planta, órganos de la planta, estado fenológico, grado de contaminación y metales en el suelo. Esta especie gramínea es tolerante a los metales pesados y puede ser usado en la fitorremediación de suelos contaminados con cadmio, plomo y zinc (95).

### **2.3. Definición de términos básicos**

**Bioacumulación:** Concentración resultante acumulada en el ambiente o en los tejidos de organismos a partir de la incorporación, distribución y eliminación de contaminantes obtenidos por todas las rutas de exposición, por ejemplo, por aire, agua, suelo, sedimento y alimento (96).

**Biodisponibilidad:** Característica de las sustancias tóxicas que indica la facilidad de incorporarse a los seres vivos mediante procesos o mecanismos, inhalación, ingesta y absorción, y que están influenciados por diferentes parámetros como las rutas de exposición, las características fisiológicas del receptor y las características químicas del xenobiótico (96).

**Contaminación:** Distribución de una sustancia química o una mezcla de sustancias en un lugar no deseable (aire, suelo, agua), donde puede ocasionar efectos adversos al ambiente o sobre la salud (96).

**Contaminante:** Cualquier sustancia química que no pertenece a la naturaleza del suelo o cuya concentración excede la del nivel de fondo susceptible de causar efectos nocivos para la salud de las personas o el ambiente (96).

**Estándar de Calidad Ambiental (ECA):** Es la medida que establece el nivel de concentración o del grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos, presentes en el aire, agua o suelo, en su condición de cuerpo receptor, que no representa riesgo significativo para la salud de las personas ni el ambiente. Según el parámetro en particular a

que se refiera, la concentración o grado podrá ser expresada en máximos, mínimos o rangos (96).

Fuente de contaminación: Punto o área de contaminación y dispersión de materiales y residuos peligrosos al ambiente, fuente que emite contaminantes al ambiente en un sitio contaminado (96).

Muestra compuesta: es aquella constituida por un conjunto de muestras simples (submuestras), convenientemente mezcladas, y llevadas al laboratorio para su correspondiente análisis, siendo el resultado un valor analítico medio de la propiedad o compuesto analizado. El número de submuestras dependerá de la variabilidad de la sustancia o propiedad para analizar en el área de estudio y tiene la ventaja de permitir un muestreo mayor sin aumentar el número de muestras por analizar (96).

Punto de muestreo: Lugar (punto o área determinada) del suelo donde se toman las muestras, sean estas superficiales o de profundidad (96).

Remediación: Tarea o conjunto de tareas por desarrollarse en un sitio contaminado con la finalidad de eliminar o reducir contaminantes, a fin de asegurar la protección de la salud humana y la integridad de los ecosistemas (96).

Suelo contaminado: Suelo cuyas características químicas, han sido alteradas negativamente por la presencia de sustancias contaminantes depositadas por la actividad humana (96).

Suelo agrícola: Suelo dedicado a la producción de cultivos, forrajes y pastos cultivados. Es también aquel suelo con aptitud para el crecimiento de cultivos y el desarrollo de la ganadería. Esto incluye tierras clasificadas como agrícolas, que mantienen un hábitat para especies permanentes y transitorias, además de flora y fauna nativa, como es el caso de las áreas naturales protegidas (96).

Degradación de los suelos: Reducción o pérdida de la productividad y complejidad biológica, física, química y agronómica de los suelos, como consecuencia de los procesos naturales o de las actividades humanas (97).

Descontaminación: Proceso de eliminación controlada de sustancias nocivas en un ambiente determinado (97).

**Metales pesados:** Elementos de elevado peso atómico potencialmente tóxicos que se emplean en procesos industriales, tales como el cadmio, el cobre, el plomo, el mercurio y el níquel que, incluso en bajas concentraciones, pueden ser nocivos para las plantas y animales (97).

**Microorganismos:** Organismos microscópicos, tales como virus, bacterias, hongos, protozoos que pueden resultar perjudiciales o beneficiosos al hombre, según sea el caso (97).

**Aerobio:** Proceso que ocurre en presencia de oxígeno. Para que un compost o una planta depuradora funcionen con éxito, se debe suministrar suficiente oxígeno para que las bacterias puedan realizar sus procesos metabólicos, esto garantiza una descomposición rápida y sin malos olores (98).

**Ambiente:** Término que describe las condiciones bióticas y abióticas que rodean un individuo o especie y que hacen referencia al conjunto de factores externos, tales como el clima, el medio físico, etc., que condicionan la vida, el crecimiento y la actividad de los seres vivos (98).

**Anaerobio:** Procesos o reacciones que pueden realizarse en ausencia de oxígeno. Microorganismos que puede desarrollarse en ausencia de oxígeno. Los organismos anaerobios juegan un papel fundamental en la fermentación y digestión de los desechos orgánicos. Las bacterias anaerobias son parte esencial de procesos industriales como el tratamiento anaerobio de los residuos biodegradables que produce metano y residuos orgánicos estabilizados (98).

**pH:** Parámetro que mide la acidez o alcalinidad de un sistema determinando la concentración de iones de hidrógeno. Si el pH es menor de 7 la solución es ácida y si es mayor que 7 la solución es alcalina (98).

## **CAPÍTULO III METODOLOGÍA**

### **3.1. Método y alcance de la investigación**

#### **3.1.1. Método de investigación**

##### **3.1.1.1. General**

El método general de investigación fue hipotético-deductivo. Consiste en un procedimiento que parte de unas aseveraciones en calidad de hipótesis y busca refutar o falsear tales hipótesis, deduciendo de ellas conclusiones que deben confrontarse con los hechos (99).

##### **3.1.1.2. Específico**

El método de investigación específico es de análisis, donde la muestra de suelo de Sincos será caracterizada en sus propiedades fisicoquímicas; el contenido de cadmio antes de la aplicación de microorganismos eficientes, y después de culminado el período de fitorremediación; así como, el contenido de cadmio en raíz, hojas y tallo de *Zea mays* L., utilizando metodologías estándar.

#### **3.1.2. Alcance de la investigación**

##### **3.1.2.1. Tipo de investigación**

La investigación es aplicada, ya que es de naturaleza práctica para aplicar las bases teóricas de la ciencia del suelo en la fitorremediación de un suelo de Sincos contaminado por cadmio, aplicando concentraciones crecientes de microorganismos eficientes.

La investigación aplicada es eminentemente práctica realizada con la intención de aplicar los conocimientos científicos a la solución o tratamiento de problemas específicos (100).

### 3.1.2.2. Nivel de investigación

La investigación es descriptivo-explicativa, porque el interés está en explicar de qué manera la variable independiente y los microorganismos eficientes aplicados al suelo influyen en la fitorremediación de cadmio.

La investigación descriptiva busca especificar las propiedades, las características de objetos que se someta a un análisis. La investigación explicativa está dirigida a responder por las causas de los fenómenos físicos. Se enfoca en explicar por qué ocurre un fenómeno y en qué condiciones se manifiesta (101).

### 3.2. Diseño de la investigación

El diseño de la investigación es experimental, fue el diseño completamente al azar (DCA), con 5 tratamientos, cada uno con 3 repeticiones, totalizando 15 unidades experimentales.

Inicialmente, se obtuvo una muestra compuesta de la capa superficial de suelo de Sincos, a una profundidad promedio de 30 cm, posteriormente fue secada al aire libre y tamizada; para ser distribuida en macetas de 5 kg cada una, donde se aplicaron los tratamientos en estudio.

**Tabla 2. Tratamientos en estudio**

Tratamiento	Descripción	Clave
1	Cultivo de <i>Zea mays</i> L. + ME: 0 %	ME_0
2	Cultivo de <i>Zea mays</i> L. + ME: 2.5 %	ME_3
3	Cultivo de <i>Zea mays</i> L. + ME: 5.0 %	ME_6
4	Cultivo de <i>Zea mays</i> L. + ME: 7.5 %	ME_9
5	Cultivo de <i>Zea mays</i> L. + ME: 10 %	ME_12

El modelo aditivo lineal del diseño experimental es el siguiente (106):

$$\gamma_{ik} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij}$$

Donde:

$\gamma_{ik}$  = cualquier observación del experimento

$\mu$  = media poblacional

$\tau_i$  = efecto del i-ésimo tratamiento

$\varepsilon_{ij}$  = error experimental

**Tabla 3. Caracterización fisicoquímica del suelo del experimento.**

Parámetro	Contenido	Calificación
pH	7.83	Ligeramente alcalino
Conductividad eléctrica (dS/m)	0.80	Muy ligeramente salino
CaCO <sub>3</sub> ( %)	10.28	Alto
Materia Orgánica ( %)	2.82	Medio
Arena ( %)	52	-
Limo ( %)	36	-
Arcilla ( %)	12	-
Clase textural	Franco	Media
Fósforo (ppm)	30.6	Alto
Potasio (ppm)	232	Medio
Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) (meq/100g)	11.68	Baja
Calcio cambiable (meq/100q)	8.14	-
Magnesio cambiable (meq/100g)	2.91	-
Potasio cambiable (meq/100g)	0.59	-
Sodio cambiable (meq/100g)	0.04	-
Hidrógeno + aluminio (meq/100 g)	0.00	-
Saturación de bases ( %)	100	Alta
Acidez cambiable ( %)	0.00	Baja
Cadmio total (ppm)	9.00	Contaminado

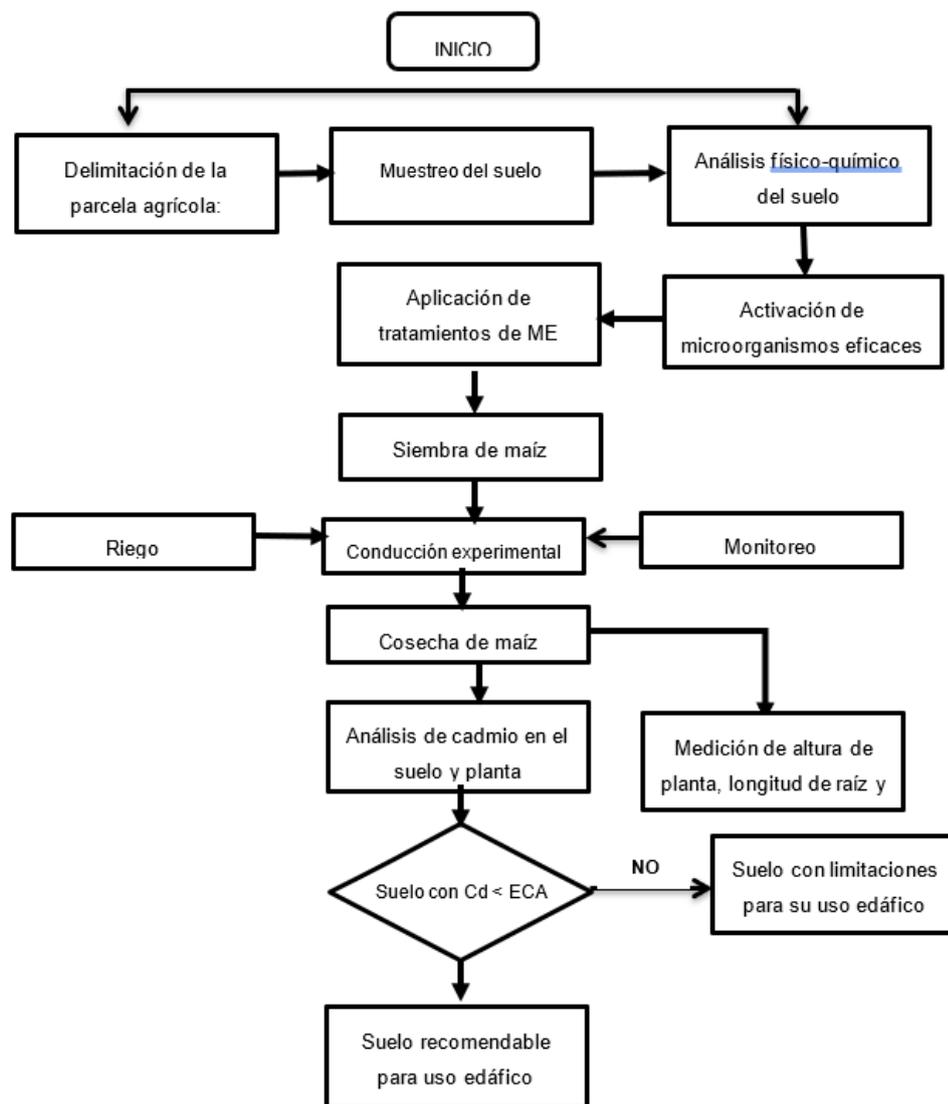
*Fuente: Laboratorio de análisis de suelos, plantas, aguas y fertilizantes de la Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima*

El suelo de Sincos tiene un pH mayor de 7, que favorece la disponibilidad de nutrientes para la planta de maíz, no presenta exceso de sales, debido a que la lluvia es suficiente para lavar la probable acumulación de sales. El alto contenido de carbonato de calcio es una evidencia de la presencia de material parental calcáreo. El contenido de materia orgánica es medio, lo cual limita la calidad del suelo. La textura tiene predominancia de arena, pero que no limita el manejo del suelo. La CIC del suelo es baja debido al bajo contenido de arcilla. El contenido de K no es limitante para su aprovechamiento por las plantas, pero se requiere

aplicaciones de este elemento. El P no limita el crecimiento de la planta por su alto contenido en el suelo. Predomina el calcio entre los cationes cambiables; estando ausente el hidrógeno y aluminio, debido al pH mayor de 7, y tiene una alta saturación de bases. El contenido de cadmio supera el ECA de suelo del Perú (1.4 ppm) en un factor de contaminación de 6.43 [ $FC_{Cd} = (9/1.4) = 6.43$ ].

#### **Activación de los microorganismos eficaces**

- Para activar los microorganismos eficaces, se hizo la activación tres días antes de su aplicación, utilizando melaza, microorganismos eficaces en solución, agua destilada, y una botella de plástico de capacidad aproximada de 600 mL.
- Para el tratamiento de 2.5 % de EM (T2), se agregó a una botella de plástico 2.5 mL de melaza, 2.5 mL de solución de EM y se completó con agua destilada hasta 100 mL. Se puso la tapa a la botella y se colocó en un ambiente donde no se recibía luz directamente.
- Para el tratamiento con 5 % de EM (T3), tres días antes de su aplicación se agregó 5.0 mL de melaza, 5.0 mL de solución de EM y se completó con agua destilada hasta 100 mL. Posteriormente, se colocó la tapa a la botella y se ubicó en un ambiente donde no se recibía luz directamente.
- Para preparar el tratamiento con 7.5 % de EM (T4), se utilizó una botella de plástico y tres días antes de su aplicación, se agregó 7.5 mL de melaza y 7.5 mL completándose con agua destilada hasta 100 mL. Se colocó la tapa a la botella y se ubicó en un ambiente donde no se recibía luz directamente.
- Para el tratamiento con 10 % de EM (T5), tres días antes de su aplicación se agregó 10.0 mL de melaza, 10.0 mL de solución de EM y se completó con agua destilada hasta 100 mL. Posteriormente, se puso la tapa a la botella y se colocó en un ambiente donde no se recibía luz directamente.
- Después de transcurrido los tres días ya estaban activados los microorganismos eficaces, entonces se agitó ligeramente las botellas que contenían los tratamientos de EM para su uniformización y se aplicó a cada unidad experimental como parte del riego a la planta.
- La activación se repitió cuatro veces para su aplicación a cada maceta durante cuatro semanas.



*Figura 4. Diagrama de flujo del proceso experimental*

### 3.3. Población y muestra

#### 3.3.1. Población

La población estuvo constituida por la parcela agrícola de suelo de Sincos, que está contaminado por metales pesados.

#### 3.3.2. Muestra

La muestra compuesta de suelo fue obtenida de la capa arable de una parcela agrícola, a través de una muestra compuesta, a una profundidad de 25 cm en promedio, en una masa aproximada de 80 kg.

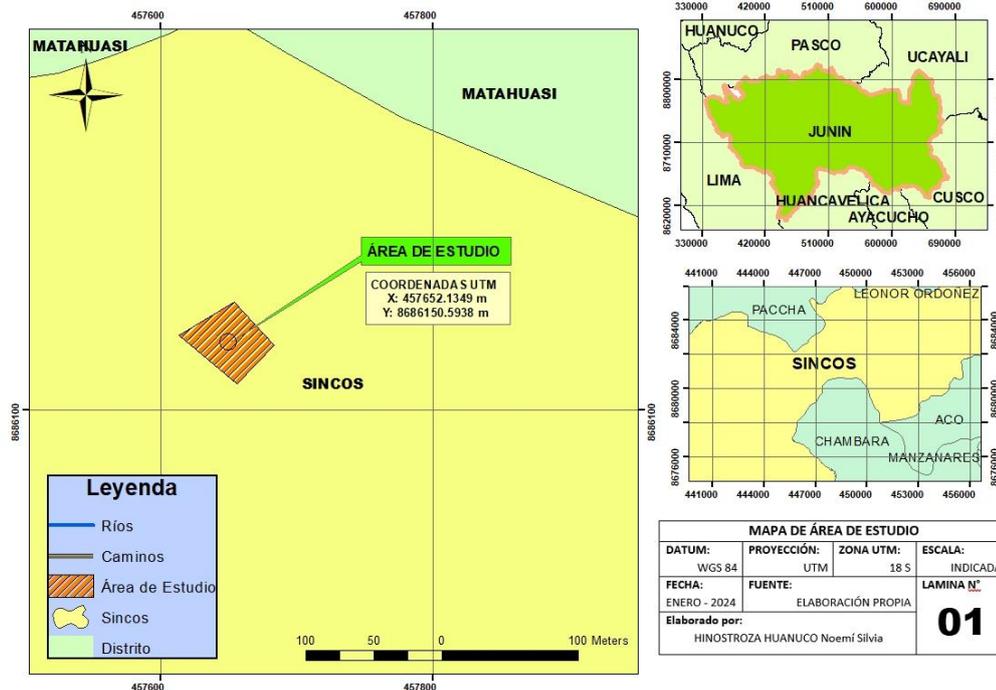


Figura 5. Ubicación de la parcela agrícola de Sincos con suelo contaminado

Tabla 4. Georreferenciación de los puntos de muestreo para obtener la muestra compuesta de la capa arable

Punto	UTM	Punto	UTM
A	457613E-8686155S	K	457641E-8686173S
B	457622E-8686146S	L	457649E-8686166S
C	457632E-8686138S	M	457657E-8686157S
D	457644E-8686129S	N	457665E-8686149S
E	457656E-8686119S	O	457674E-8686139S
F	457627E-8686165S	P	457654E-8686180S
G	457637E-8686156S	Q	457661E-8686173S
H	457644S-8686148S	R	457668E-8686165S
I	457655E-8686140S	S	457674E-8686157S
J	457666E-8686131S	T	457683E-8686148S

### 3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

#### 3.4.1. Evaluaciones realizadas

Las evaluaciones se realizaron a los 80 días después de la siembra, debido a que se observó que las plantas tenían limitado crecimiento debido al poco volumen de suelo disponible y el periodo de rápido crecimiento había culminado. Los experimentos en cobertores incluyen evaluación de plantas en crecimiento en pequeñas cantidades de suelo y corto período de crecimiento (104).

##### 3.4.1.1. Altura de planta

A los 80 días después de la siembra se evaluó la altura de planta, midiendo con una regla graduada desde la base del cuello de cada planta en cada maceta hasta la parte apical. Luego se obtuvo un promedio de un total de tres plantas por maceta.

#### **3.4.1.2. Longitud de raíz**

La longitud de raíz se evaluó al final del experimento, midiendo la raíz de cada planta, desde el cuello de la planta hasta el ápice de la raíz, después de haber extraído la planta. Luego se obtuvo un promedio del total de tres plantas por maceta.

#### **3.4.1.3. Materia seca aérea**

Al momento de la finalización del experimento (80 días después de la siembra), se cortó la parte aérea de cada planta en cada maceta (3 plantas), desde el ras del suelo y se colocó en una bolsa de papel Kraft, debidamente identificada para ser llevada al laboratorio y colocar en la estufa a una temperatura de 60 °C durante 24 horas para finalmente pesar cada unidad experimental y determinar la materia seca aérea.

#### **3.4.1.4. Materia seca radicular**

Las raíces de las plantas de cada maceta (3 plantas), se lavaron cuidadosamente y se orearon para después ser colocadas en una bolsa de papel Kraft, debidamente etiquetada, para ser llevada al laboratorio y obtener la materia seca de cada unidad experimental.

#### **3.4.1.5. Análisis de cadmio total en la parte aérea**

Las muestras secas de la parte aérea de cada maceta, debidamente identificadas fueron enviadas al Laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas, Aguas y Fertilizantes de la Facultad de Agronomía de la UNALM, para el análisis de Cd total.

#### **3.4.1.6. Análisis de cadmio total en la parte radicular**

Las muestras secas de las raíces de cada maceta, debidamente identificadas fueron enviadas al Laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas, Aguas y Fertilizantes de la Facultad de Agronomía de la UNALM, para el análisis de Cd total.

#### **3.4.1.7. Factor de traslocación (FT)**

Para calcular el factor de traslocación de Cd, se relacionó el contenido de este metal pesado en la parte aérea y raíz, utilizando la siguiente expresión:

$$FT = \frac{\text{Concentración de Cd en la parte aérea de Zea mays L.}}{\text{Concentración de Cd en la raíz de Zea mays L.}}$$

### 3.4.1.8. Factor de bioconcentración (FBC)

Para calcular el FBC de Cd, se relacionó el contenido de metal en la parte aérea, parte radicular y total, respecto al contenido del metal en el suelo, utilizando las siguientes expresiones:

$$FBC \text{ parte aérea} = \frac{\text{Concentración de Cd en la parte aérea de Zea mays L.}}{\text{Concentración de Cd en el suelo}}$$

$$FBC \text{ parte radicular} = \frac{\text{Concentración de Cd en la parte radicular de Zea mays L.}}{\text{Concentración de Cd en el suelo}}$$

$$FBC \text{ total} = \frac{\text{Concentración de Cd en la parte aérea y radicular de Zea mays L.}}{\text{Concentración de Cd en el suelo}}$$

### 3.4.1.9. Contenido final de Cd en el suelo

Al finalizar el experimento, y después de haber extraído las plantas de maíz, se mezcló el suelo uniformemente, para posteriormente extraer una muestra de 500 g de cada maceta, utilizando el método del cuarteo; se colocó en una bolsa de polietileno transparente, debidamente identificada, y se envió al Laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas, Aguas y Fertilizantes de la Facultad de Agronomía de la UNALM, para el análisis de Cd total.

### 3.4.2. Procesamiento de datos

Al finalizar la obtención de datos estos fueron sistematizados, se verificó la distribución normal de cada variable utilizando la prueba Shapiro-Wilk; si la variable evaluada tenía distribución normal se realizó el análisis de variancia y la prueba de significación de Duncan; si la variable evaluada no tenía distribución normal se realizó la prueba paramétrica de Kruskal-Wallis. Se utilizó el *software* Infostat (102) y la hoja de cálculo de Excel. En la tabla 4 se presenta el ANVA del DCA.

**Tabla 5. Esquema del análisis de variancia del diseño completamente al azar**

Fuentes de variación	Grados de libertad (GL)	Suma de cuadrados (SC)	Cuadrado medio (CM)	Fc
Tratamientos (T)	$(t-1) = (6-1) = 5$	$\frac{Y_1^2 + \dots + Y_6^2}{r} - \frac{Y_{..}^2}{rt}$	$SC_T/GL_T$	$CM_T/CM_{EE}$
Error Experimental (EE)	$t(r-1) = 6(3-1) = 12$	$SC_{TT} - SC_T$	$SC_{EE}/GL_{EE}$	
Total (TT)	$rt-1 = (3)(6) - 1 = 17$	$\sum_{ij} y_{ij}^2 - \frac{Y_{..}^2}{rt}$	$SC_{TT}/GL_{TT}$	

Fuente: Steel y Torrie (103)

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1. Resultados del tratamiento y análisis de la información

Los resultados de los análisis de planta y suelo fueron procesados y se presentan a continuación.

##### 4.1.1. Efecto de la dosis de los microorganismos eficientes de los indicadores de fitorremediación

Los indicadores de fitorremediación lo constituyen el factor de bioacumulación y el factor de traslocación. Estos constituyen relaciones del contenido de Cd en el suelo y la planta (factor de bioacumulación) o entre el Cd en la parte aérea de la planta respecto a la raíz (FBr).

##### 4.1.1.1. Factor de bioconcentración aérea (FBa)

**Tabla 6. Resultados del FBa de maíz en el suelo de Sincos**

Tratamiento	Dosis de ME (%)	Repeticiones			Promedio
		I	II	III	
1	0	0.13	0.11	0.11	0.117
2	2.5	0.10	0.12	0.14	0.120
3	5.0	0.12	0.10	0.14	0.120
4	7.5	0.14	0.14	0.15	0.143
<b>5</b>	<b>10.0</b>	<b>0.13</b>	<b>0.16</b>	<b>0.15</b>	<b>0.147</b>

En la tabla 6 se observa que el FBa tuvo en el tratamiento 5 (10 % de ME) el promedio más alto, mostrando el efecto de la mayor dosis de los ME en la acumulación de Cd en la parte aérea. El testigo tuvo el más bajo valor. Los datos encontrados son menores que la unidad, lo cual indica una baja fitoextracción de Cd por este cultivo. Este dato es importante pues cuando los valores son mayores que la unidad las plantas se consideran fitoextractoras.

#### 4.1.1.2. Factor de bioconcentración radicular (FBr)

**Tabla 7. Resultados del FBr de maíz en el suelo de Sincos**

Tratamiento	Dosis de ME (%)	Repeticiones			Promedio
		I	II	III	
1	0	0.69	0.70	0.75	0.713
2	2.5	0.72	0.67	0.65	0.680
3	5.0	0.64	0.55	0.51	0.567
4	7.5	0.79	0.61	0.44	0.613
<b>5</b>	<b>10.0</b>	<b>0.88</b>	<b>0.84</b>	<b>0.50</b>	<b>0.740</b>

En la tabla 7, el FBr tuvo en el tratamiento 5 (10 % de ME), el promedio más alto. En general los demás tratamientos ME fueron menores, incluyendo el testigo, donde no se aplicó ME. Los promedios encontrados fueron menores que la unidad, lo cual indica una baja fitoextracción de Cd hacia la raíz, pero superiores a lo hallado en el FBa.

#### 4.1.1.3. Factor de bioconcentración total (FBt)

**Tabla 8. Resultados del FBt de maíz en el suelo de Sincos**

Tratamiento	Dosis de ME (%)	Repeticiones			Promedio
		I	II	III	
1	0	0.817	0.817	0.856	0.830
2	2.5	0.170	0.791	0.792	0.584
3	5.0	0.761	0.650	0.647	0.686
4	7.5	0.933	0.756	0.592	0.760
<b>5</b>	<b>10.0</b>	<b>1.011</b>	<b>0.997</b>	<b>0.651</b>	<b>0.886</b>

En la tabla 8, el FBt más alto estuvo en el tratamiento 5 (10 % de ME), mostrando el efecto de la mayor dosis de ME (10 %) en la absorción de Cd por maíz, comparado con los demás tratamientos. Como los valores fueron menores que la unidad, se tiene una baja fitoextracción de Cd por este cultivo.

#### 4.1.1.4. Factor de traslocación (FT)

**Tabla 9. Resultados del FT de maíz en el suelo de Sincos**

Tratamiento	Dosis de ME (%)	Repeticiones			Promedio
		I	II	III	
1	0	0.185	0.162	0.141	0.163
<b>2</b>	<b>2.5</b>	0.140	0.181	0.218	0.180
3	5.0	0.191	0.188	0.280	0.220
<b>4</b>	<b>7.5</b>	<b>0.183</b>	<b>0.231</b>	<b>0.331</b>	<b>0.248</b>
5	10.0	0.152	0.185	0.294	0.210

En la tabla 9 se observa que el promedio de FT tuvo en el tratamiento 4 (7.5 % de ME) su mayor valor y en el tratamiento 1 (0 % de ME) su valor más bajo. Esto es una evidencia indirecta de la traslocación de Cd de la raíz hacia la parte aérea por efecto de los microorganismos aplicados. Como los valores son bajos se puede inferir que el maíz no traslocó fácilmente el Cd absorbido por la raíz.

La traslocación de elementos absorbidos por la raíz hacia la parte aérea de la planta, está determinada por diversos factores, como el tipo de elemento químico, carácter genético de la planta, por lo que la influencia de los ME aplicados al suelo, lo que ha favorecido es la absorción de Cd hasta la raíz.

#### 4.1.2. Efecto de la dosis de los microorganismos eficaces en el crecimiento de maíz

##### 4.1.2.1. Altura de planta

**Tabla 10. Resultados de la altura de planta de maíz (cm) en un suelo de Sincos**

Tratamiento	Dosis de ME (%)	Repeticiones (cm)			Promedio (cm)
		I	II	III	
1	0	85.167	72.333	84.667	80.722
2	2.5	117.500	84.667	97.500	99.889
3	5.0	<b>130.333</b>	<b>124.667</b>	<b>114.000</b>	<b>123.000</b>
4	7.5	107.667	88.000	104.000	99.889
5	10.0	86.000	93.333	55.000	78.111

En la tabla 10 se observa que la altura de planta tuvo gran variación en cada tratamiento, siendo el promedio más alto el logrado por el tratamiento con 5 % de ME (T3), evidenciando el efecto de los microorganismos en la descomposición de materia orgánica, que incrementa la disponibilidad de nutrientes y crecimiento de la planta en un suelo contaminado con Cd.

##### 4.1.2.2. Longitud de raíz

**Tabla 11. Resultados de la longitud de raíz de maíz (cm) en un suelo de Sincos**

Tratamiento	Dosis de ME (%)	Repeticiones (cm)			Promedio (cm)
		I	II	III	
1	0	10.000	12.000	11.333	11.111
2	2.5	<b>14.500</b>	<b>13.000</b>	<b>17.333</b>	<b>14.944</b>
3	5.0	13.667	11.000	15.000	13.222
4	7.5	12.333	11.667	14.000	12.667
5	10.0	13.333	13.667	11.333	12.778

En la tabla 11 se observa que la longitud de raíz en los tratamientos aplicados tuvo poca variación (de 11.111 cm a 14.944), comparado a la altura de planta, siendo el tratamiento 2 (2.5 % de ME) el mayor promedio, posiblemente debido a que a esa dosis de ME la raíz logró su mayor desarrollo en el suelo contaminado. El promedio más bajo se presenta en el testigo (T1), donde no se aplicó microorganismos.

#### 4.1.2.3. Materia seca de la parte aérea

**Tabla 12. Resultados de la materia seca aérea de maíz (g) en un suelo de Sincos**

Tratamiento	Dosis de ME (%)	Repeticiones (g)			Promedio (g)
		I	II	III	
1	0	14.775	13.966	14.040	14.260
2	2.5	24.709	17.132	17.244	19.695
3	5.0	<b>31.905</b>	<b>24.586</b>	<b>20.672</b>	<b>25.721</b>
4	7.5	24.152	16.242	19.691	20.028
5	<b>10.0</b>	15.283	18.859	13.107	15.750

Según la tabla 12, el peso de materia seca aérea tuvo en el tratamiento 3 (5 % de ME) el promedio más alto, atribuible al efecto de la aplicación de microorganismos eficaces al suelo contaminado; lo que ocasionó mayor descomposición de la materia orgánica presente en el suelo, mayor adsorción o retención de contaminantes y mayor formación de materia seca.

#### 4.1.2.4. Materia seca de raíz

**Tabla 13. Resultados de la materia seca radicular de maíz (g) en un suelo de Sincos**

Tratamiento	Dosis de ME (%)	Repeticiones (g)			Promedio (g)
		I	II	III	
1	0	11.975	12.992	13.083	12.683
2	2.5	13.934	10.974	11.134	12.014
3	5.0	14.342	10.636	10.827	11.935
4	7.5	13.845	10.204	10.667	11.572
5	<b>10.0</b>	<b>23.693</b>	<b>22.382</b>	<b>10.089</b>	<b>18.721</b>

El peso de materia seca de raíz tuvo su mayor promedio en el tratamiento 5 (10 % de ME), atribuible al mejoramiento de las propiedades del suelo con los microorganismos eficaces. Este tratamiento no fue el que tuvo mayor longitud de raíz, lo que demuestra una mayor ramificación de la raíz por efecto del tratamiento aplicado. Los datos se presentan en la tabla 13.

#### 4.1.3. Contenido de cadmio total en el suelo

**Tabla 14. Resultados del contenido de Cd total en el suelo de Sincos**

Tratamiento	Dosis de ME (%)	Repeticiones (mg.kg <sup>-1</sup> )			Promedio (mg.kg <sup>-1</sup> )
		I	II	III	
1	0	<b>6.51</b>	<b>7.17</b>	<b>7.42</b>	<b>7.033</b>
2	2.5	7.19	5.98	7.73	6.967
3	5.0	6.79	6.76	7.11	6.887
4	7.5	6.65	7.08	7.68	7.137
5	<b>10.0</b>	<b>6.37</b>	<b>6.43</b>	<b>6.65</b>	<b>6.483</b>

El contenido de Cd total en el suelo al final del experimento fue mayor en el tratamiento 1 (control, 0 % de ME), y menor en los demás tratamientos, lo cual se atribuye principalmente al efecto fitorremediador del cultivo de maíz asistido por los microorganismos eficaces. El rol de los microorganismos eficaces es descomponer la materia orgánica presente en el suelo y

favorecer la adsorción de Cd en el suelo, disminuyendo su concentración total. Los datos se presentan en la tabla 14.

## 4.2. Prueba de hipótesis

### 4.2.1. Hipótesis específica 1

Ho: Las concentraciones crecientes de microorganismos eficientes no afectan los indicadores de fitorremediación de Cd: factor de bioconcentración y factor de traslocación.

Ha: Las concentraciones crecientes de microorganismos eficientes afectan significativamente a los indicadores de fitorremediación de Cd: factor de bioconcentración y factor de traslocación

#### 4.2.1.1. Factor de bioconcentración aérea (FBa)

Para comprobar la hipótesis planteada, primero se verificó la distribución normal de los datos de la población de donde provino la muestra, para lo cual se aplicó la prueba de Shapiro-Wilk.

Para la prueba de normalidad se planteó la siguiente hipótesis:

Ho: La población está distribuida normalmente.

Ha: La población no está distribuida normalmente.

Nivel de significación:  $\alpha = 0.05$

**Tabla 15. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para el FBa**

Tratamiento	Dosis de ME (%)	Promedio	p-valor
1	0	<b>0.117</b>	<b>&lt;0.0001</b>
2	2.5	0.120	>0.9999
3	5.0	0.120	>0.9999
4	7.5	<b>0.143</b>	<b>&lt;0.0001</b>
5	<b>10.0</b>	0.147	0.6394

Como el valor  $p$ , en los tratamientos es mayor que 1 y 4 son menores que 0.05, se rechaza la hipótesis nula (Ho). La población de donde proviene la muestra no está distribuida normalmente. Los datos se presentan en la tabla 15. Posteriormente se desarrolló la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis.

**Tabla 16. Prueba de Kruskal-Wallis para el FBa**

F. de V.	N	H	valor $p$
Tratamientos	3	7.15	0.1187

La prueba de Kruskal-Wallis muestra que el valor  $p$  para tratamientos es mayor que 0.05, indicando que no hay diferencias significativas entre tratamientos para FBa. Esto permite aceptar la hipótesis nula, que indica que los ME no afectan el FBa. Los datos se presentan en la tabla 16.

#### 4.2.1.2. Factor de bioconcentración radicular (FBr)

Para comprobar la hipótesis planteada, primero se verificó la distribución normal de los datos de la población de donde provino la muestra, para lo cual se aplicó la prueba de Shapiro-Wilk.

Para la prueba de normalidad se planteó la siguiente hipótesis:

Ho: La población está distribuida normalmente.

Ha: La población no está distribuida normalmente.

Nivel de significación:  $\alpha = 0.05$

**Tabla 17. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para el FBa.**

Tratamiento	Dosis de ME (%)	Promedio	valor $p$
1	0	0.713	0.2962
2	2.5	0.680	0.5351
3	5.0	0.567	0.5813
4	7.5	0.613	0.9679
5	10.0	0.740	0.1839

Como el valor  $p$ , en todos los tratamientos es mayor que 0.05, se acepta la hipótesis nula (Ho). La población de donde proviene la muestra está distribuida normalmente. Los datos se presentan en la tabla 17, esto permitió desarrollar el análisis de variancia.

**Tabla 18. Análisis de variancia para el FBr**

F. de V.	SC	GL	CM	Fc	valor $p$
Tratamientos	0.061	4	0.015	0.949	0.4754
Error	0.162	10	0.016		
Total	0.223	14			

$$S = 0.126 \bar{x} = 0.663 \text{ CV} = 19.207 \%$$

En la tabla 18 del análisis de variancia, se observa que el valor  $p$  en la fuente de variación de tratamientos es mayor que 0.05, indicando que los tratamientos no afectaron el FBr. Esto permite aceptar la hipótesis nula, lo cual permite indicar que los ME no afectaron el FBr. El CV permite indicar que hubo heterogeneidad en los datos.

#### 4.2.1.3. Factor de bioconcentración total (FBt)

Para comprobar la hipótesis planteada, primero se verificó la distribución normal de los datos de la población de donde provino la muestra, para lo cual se aplicó la prueba de Shapiro-Wilk.

Para la prueba de normalidad se planteó la siguiente hipótesis:

Ho: La población está distribuida normalmente.

Ha: La población no está distribuida normalmente.

Nivel de significación:  $\alpha = 0.05$

**Tabla 19. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para el FBt**

Tratamiento	Dosis de ME (%)	Promedio	valor <i>p</i>
1	0	0.830	<0.0001
2	2.5	0.800	0.0645
3	5.0	0.686	0.0434
4	7.5	0.760	0.9574
5	<b>10.0</b>	0.886	0.0656

Como el valor *p*, en los tratamientos 1 y 3 son menores que 0.05, se rechaza la hipótesis nula (Ho) y se acepta la hipótesis alternativa (Ha). La población de donde proviene la muestra no está distribuida normalmente. Los datos se presentan en la tabla 19. Posteriormente se desarrolló la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis.

**Tabla 20. Prueba de Kruskal-Wallis para el FBt**

F. de V.	N	H	valor <i>p</i>
Tratamientos	5	5.667	0.2221

La prueba de Kruskal-Wallis muestra que el valor *p* para tratamientos es mayor que 0.05, indicando que no hay diferencias significativas entre tratamientos para FBt. Esto permite aceptar la hipótesis nula, indicando que los ME no afectaron el FBt. Los datos se presentan en la tabla 20.

#### 4.2.1.4. Factor de traslocación (FT)

Para comprobar la hipótesis planteada, primero se verificó la distribución normal de los datos de la población de donde provino la muestra, para lo cual se aplicó la prueba de Shapiro-Wilk.

Para la prueba de normalidad se planteó la siguiente hipótesis:

Ho: La población está distribuida normalmente.

Ha: La población no está distribuida normalmente.

Nivel de significación:  $\alpha = 0.05$

**Tabla 21. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para el FT**

Tratamiento	Dosis de ME (%)	Promedio	valor $p$
1	0	0.163	0.9486
2	2.5	0.180	0.9423
3	5.0	0.220	0.0533
4	7.5	0.248	0.6142
	10.0	0.210	0.4280

En la tabla 20 se observa que el valor  $p$ , en todos los tratamientos es mayor que 0.05 y se acepta la hipótesis nula ( $H_0$ ). La población de donde proviene la muestra está distribuida normalmente. Esto permitió desarrollar el análisis de variancia.

**Tabla 22. Análisis de variancia para el FT**

F. de V.	SC	GL	CM	Fc	valor $p$
Tratamientos	0.014	4	0.003	1.069	0.4211
Error	0.032	10	0.003		
Total	0.046	14			

$$S = 0.055 \quad \bar{x} = 0.204 \quad CV = 26.679 \%$$

En la tabla 22, se observa que el valor  $p$  en la fuente de variación tratamientos es mayor que 0.05, indicando que los ME no afectaron el FT. Esto permite aceptar la hipótesis nula. El coeficiente de variabilidad es alto, indicando heterogeneidad de los datos.

#### 4.2.2. Hipótesis específica 2:

$H_0$ : Las concentraciones crecientes de microorganismos eficientes no afectan el crecimiento de maíz: altura de planta, longitud de raíz, materia seca aérea y radicular.

$H_a$ : Las concentraciones crecientes de microorganismos eficientes afectan significativamente el crecimiento de maíz: altura de planta, longitud de raíz, materia seca aérea y radicular.

##### 4.2.2.1. Altura de planta

Para comprobar la hipótesis planteada, primero se verificó la distribución normal de los datos de la población de donde provino la muestra, para lo cual se aplicó la prueba de Shapiro-Wilk.

Para la prueba de normalidad se planteó la siguiente hipótesis:

$H_0$ : La población está distribuida normalmente.

$H_a$ : La población no está distribuida normalmente.

Nivel de significación:  $\alpha = 0.05$

**Tabla 23. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para la altura de planta de maíz**

Tratamiento	Dosis de ME (%)	Promedio (cm)	valor <i>p</i>
1	0	80.772	0.0656
2	2.5	99.889	0.7577
3	5.0	123.000	0.6632
4	7.5	99.889	0.3334
5	<b>10.0</b>	78.111	0.3424

En la tabla 23, el valor *p*, en todos los tratamientos es mayor que 0.05, por lo que se acepta la hipótesis nula ( $H_0$ ). La población de donde proviene la muestra está distribuida normalmente, esto permitió desarrollar el análisis de variancia.

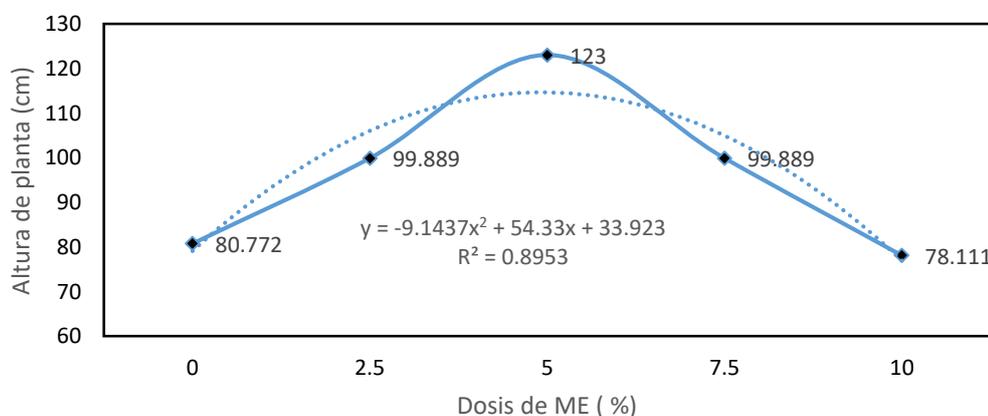
**Tabla 24. Cuadrado medio del análisis de variancia para la altura de planta de maíz (cm)**

F. de V.	GL	CM	Significación
Tratamientos	4	984.115	*
Error	10	183.762	
Total	14		
Contrastes			
Lineal	1	8.183	ns
Cuadrática	1	3516.967	**
Cúbica	1	2.046	ns

$$S = 13.556 \quad \bar{x} = 96.322 \quad CV = 14.074 \%$$

La tabla 24 presenta el análisis de variancia para la altura de planta de maíz. En la fuente de variación tratamientos (dosis de ME) se observa significación estadística ( $p < 0.05$ ), evidenciando el rechazo de la hipótesis nula, indicando que por lo menos un par de tratamientos fueron diferentes.

En la misma tabla 24, sobre la base de los contrastes ortogonales, se observa que existen diferencias altamente significativas ( $p < 0.01$ ) en el contraste cuadrático.



**Figura 6. Contraste cuadrático del efecto de dosis de ME en altura de planta de maíz**

En la figura 6 se presenta el contraste cuadrático de la altura de planta, con un coeficiente de determinación de 0.8953, indicando que el 89.53 % de la variabilidad de la altura de planta se debe a las dosis de ME. El incremento de altura de planta se inicia con 2.5 % de ME y alcanza un máximo con 5 % de ME, descendiendo a dosis más altas. Esto se atribuye al efecto de los ME en mejorar la disponibilidad de nutrientes por la mayor descomposición de la materia orgánica e inmovilizar el Cd al ser adsorbido en la materia orgánica descompuesta.

#### 4.2.2.2. Longitud de raíz

Para comprobar la hipótesis planteada, primero se verificó la distribución normal de los datos de la población de donde provino la muestra, para lo cual se aplicó la prueba de Shapiro-Wilk.

Para la prueba de normalidad se planteó la siguiente hipótesis:

Ho: La población está distribuida normalmente.

Ha: La población no está distribuida normalmente.

Nivel de significación:  $\alpha = 0.05$

**Tabla 25. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para longitud de raíz de maíz**

Tratamiento	Dosis de ME (%)	Promedio (cm)	valor p
1	0	11.111	0.6368
2	2.5	14.944	0.6612
3	5.0	13.222	0.6392
4	7.5	12.667	0.5346
5	<b>10.0</b>	12.778	0.2524

En la tabla 25, de la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk, el valor  $p$ , en todos los tratamientos es mayor que 0.05, por lo que se acepta la hipótesis nula (Ho). La población de donde proviene la muestra está distribuida normalmente, lo que permitió desarrollar el análisis de variancia.

**Tabla 26. Análisis de variancia para la longitud de raíz de maíz (cm)**

F. de V.	SC	GL	CM	Fc	valor p
Tratamientos	22.630	4	5.657	2.165	0.1467
Error	26.129	10	2.613		
Total	48.759	14			

$$S = 1.616 \bar{x} = 12.944 \text{ CV} = 12.484 \%$$

En la tabla 26, del análisis de variancia para longitud de raíz, se observa que el valor  $p$  en la fuente de variación tratamientos es mayor que 0.05, indicando que la altura de planta

promedio de maíz no es significativamente diferentes en los cinco tratamientos, debido a la aplicación de microorganismos eficientes. Esto valida la hipótesis nula.

#### 4.2.2.3. Materia seca aérea

Para comprobar la hipótesis planteada, primero se verificó la distribución normal de los datos de la población de donde provino la muestra, para lo cual se aplicó la prueba de Shapiro-Wilk.

Para la prueba de normalidad se planteó la siguiente hipótesis:

Ho: La población está distribuida normalmente.

Ha: La población no está distribuida normalmente.

Nivel de significación:  $\alpha = 0.05$

**Tabla 27. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para la materia seca aérea de maíz**

Tratamiento	Dosis de ME (%)	Promedio (g)	valor p
1	0	14.260	0.1585
2	2.5	<b>19.695</b>	<b>0.0243</b>
3	5.0	25.721	0.6663
4	7.5	20.028	0.8591
5	<b>10.0</b>	15.750	0.7398

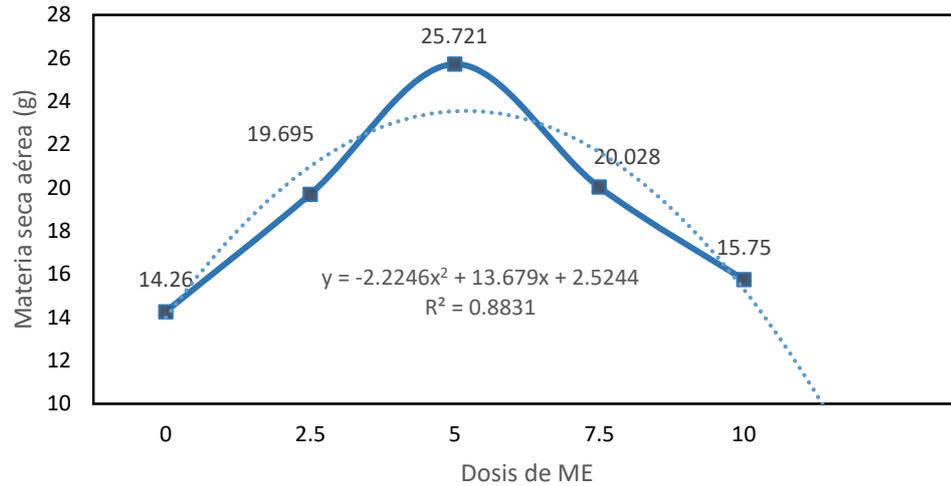
Como el valor  $p$ , en el tratamiento 2 es menor que 0.05, se rechaza la hipótesis nula (Ho). La población de donde proviene la muestra no está distribuida normalmente. Los datos se presentan en la tabla 27. Posteriormente, se desarrolló la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis.

**Tabla 28. Prueba de Kruskal-Wallis para materia seca aérea de maíz (g)**

F. de V.	N	H	valor p	Significación
Tratamientos	5	9.533	0.0491	*
Contrastes				
Lineal		0.202	0.6534	ns
Cuadrática		9.011	0.0027	**
Cúbica		0.107	0.7440	ns

La tabla 28, de la prueba de Kruskal-Wallis para materia seca aérea de maíz, muestra que el valor  $p$  para tratamientos es menor que 0.05, indicando que hay diferencias significativas entre tratamientos para la materia seca aérea. Esto permite rechazar la hipótesis nula.

En la misma tabla, del análisis de los contrastes ortogonales, se observa que existen diferencias estadísticas altamente significativas ( $p < 0.05$ ) en el contraste cuadrático.



**Figura 7. Contraste cuadrático del efecto de dosis de ME en materia seca aérea de maíz**

En la figura 7 se presenta el contraste cuadrático de la materia seca aérea de maíz, con un coeficiente de determinación de 0.8831, indicando que el 88.31 % de la variabilidad de la materia seca aérea de maíz se debe a las dosis de ME aplicadas al suelo contaminado. La materia seca aérea se incrementa con 2.5 % de ME y se maximiza con 5 % de ME, descendiendo a dosis mayores. Este modelo es considerado fiable para el uso de ME en suelos contaminados.

#### 4.2.2.4. Materia seca radicular

Para comprobar la hipótesis planteada, primero se verificó la distribución normal de los datos de la población de donde provino la muestra, para lo cual se aplicó la prueba de Shapiro-Wilk.

Para la prueba de normalidad se planteó la siguiente hipótesis:

Ho: La población está distribuida normalmente.

Ha: La población no está distribuida normalmente.

Nivel de significación:  $\alpha = 0.05$

**Tabla 29. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para la materia seca radicular de maíz**

Tratamiento	Dosis de ME (%)	Promedio (g)	valor p
1	0	12.683	0.1421
2	2.5	12.014	0.0915
3	5.0	11.935	0.0884
4	7.5	11.572	0.2231
5	<b>10.0</b>	18.721	0.1684

En la tabla 29 se presenta la prueba de Shapiro-Wilk para determinar la normalidad de los datos, observándose que el valor  $p$ , en todos los tratamientos es mayor que 0.05, por lo que

se acepta la hipótesis nula ( $H_0$ ), indicando que la población de donde proviene la muestra está distribuida normalmente, esto permitió el desarrollo del análisis de variancia.

**Tabla 30. Análisis de variancia para materia seca radicular de maíz (g)**

F. de V.	SC	GL	CM	Fc	valor $p$
Tratamientos	108.714	4	27.178	2.006	0.1696
Error	135.500	10	13.550		
Total	244.214	14			

$$S = 3.681 \quad \bar{x} = 13.385 \quad CV = 27.501 \%$$

En la tabla 30 se presenta el análisis de variancia para la materia seca radicular, observándose que el valor  $p$  en la fuente de variación tratamientos es mayor que 0.05, indicando que la materia seca radicular promedio de maíz no es significativamente diferente en los cinco tratamientos, debido a la aplicación de microorganismos eficientes. Esto valida la hipótesis nula.

#### 4.2.3. Hipótesis específica 3

$H_0$ : La aplicación de concentraciones crecientes de microorganismos eficientes no afecta la concentración de cadmio en el suelo.

$H_a$ : La aplicación de concentraciones crecientes de microorganismos eficientes afecta significativamente la concentración de cadmio en el suelo

##### 4.2.3.1. Contenido final de cadmio en el suelo

Para comprobar la hipótesis planteada, primero se verificó la distribución normal de los datos de la población de donde provino la muestra, para lo cual se aplicó la prueba de Shapiro-Wilk.

Para la prueba de normalidad se planteó la siguiente hipótesis:

$H_0$ : La población está distribuida normalmente.

$H_a$ : La población no está distribuida normalmente.

Nivel de significación:  $\alpha = 0.05$

**Tabla 31. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para el contenido final de Cd en el suelo**

Tratamiento	Dosis de ME (%)	Promedio (mg.kg <sup>-1</sup> )	valor $p$
1	0	7.033	0.5130
2	2.5	6.967	0.5826
3	5.0	6.887	0.1463
4	7.5	7.137	0.8241
5	<b>10.0</b>	6.483	0.3877

En la tabla 31 se presenta la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para el contenido final de Cd en el suelo y determinar la normalidad de los datos. Como el valor  $p$ , en todos los tratamientos es mayor que 0.05, se acepta la hipótesis nula ( $H_0$ ). La población de donde proviene la muestra está distribuida normalmente, esto permitió realizar el análisis de variancia.

**Tabla 32. Análisis de variancia para el contenido final de Cd en el suelo ( $mg.kg^{-1}$ )**

F. de V.	SC	GL	CM	Fc	valor $p$
Tratamientos	0.756	4	0.189	0.699	0.6097
Error	2.702	10	0.270		
Total	3.458	14			

$$S = 0.520 \bar{x} = 6.901 \text{ CV} = 7.530 \%$$

En la tabla 32 se presenta el análisis de variancia para el contenido final de Cd en el suelo, observándose que el valor  $p$  en la fuente de variación de tratamientos es mayor que 0.05, indicando que el contenido final de Cd en el suelo no es significativamente diferente en los cinco tratamientos, debido a la aplicación de microorganismos eficientes. Esto valida la hipótesis nula.

#### 4.2.3.2. Variación del contenido final de Cd en el suelo

Considerando el contenido inicial de Cd en el suelo, se presentan los resultados de la variación de este metal pesado al final del experimento, utilizando la siguiente expresión:

$$\text{Variación (\%)} \text{ Cd en suelo} = \frac{(\text{Cd final} - \text{Cd inicial})}{(\text{Cd inicial})} \times 100$$

**Tabla 33. Variación (%) del contenido final de cadmio**

Tratamiento	Dosis de ME (%)	Cd inicial (mg/kg)	Cd final (mg/kg)	Variación (%)
1	0	9.00	7.033	-21.86
2	2.5	9.00	6.967	-22.59
3	5.0	9.00	6.887	-23.48
4	7.5	9.00	7.137	-20.70
5	10.0	9.00	6.483	-5.74
Promedio	-	9.00	7.301	-18.87

Se tuvo una disminución promedio de 18.87 % de Cd en el suelo del experimento, siendo el tratamiento con 5 % de ME el que tuvo el mayor valor (-23.48 %), sin diferencias significativas con los demás tratamientos. Los datos se presentan en la tabla 33.

### 4.3. Discusión de resultados

La aplicación de microorganismos eficaces en el cultivo de maíz, en dosis crecientes de 0 % a 10 %, incrementó el factor de bioconcentración (FB) de Cd en la parte aérea, parte

radicular y total de maíz con el tratamiento de 10 %, pero sin diferencias significativas con los demás tratamientos. Los valores fueron menores que la unidad, indicando que en las condiciones del suelo contaminado del experimento (9 mg Cd/kg suelo), no se comportó como una especie fitoextractora.

En un trabajo similar, aplicando ME a *Sonchus arvensis* («Cerraja»), se observó un incremento significativo del FB en hojas y FB total con la dosis de 10 % (18), pero siempre con valores inferiores a la unidad. Esto permite deducir que las especies consideradas malezas como *S. arvensis* tendrían mayor potencial relativo de fitoextracción de Cd, respecto a las plantas cultivadas.

Esto también se corrobora en el trabajo de investigación realizado al evaluar flora nativa en suelos contaminados (Bosnia) (23), donde todas las plantas estudiadas tuvieron una baja habilidad para remover o estabilizar metales pesados en el suelo. Esto se atribuye probablemente a la pobre movilidad y disponibilidad del Cd en el suelo, donde los microorganismos eficaces antes que solubilizar los metales pesados, lo absorben o complejan y de esa manera las plantas que están creciendo en ese suelo no lo absorben fácilmente.

Estos datos tienen relación con el reporte que indica que el maíz es tolerante a metales pesados, con una habilidad para acumular metales pesados y con un moderado factor de bioacumulación (94).

El factor de traslocación, que significa la relación Cd parte aérea respecto a Cd en la raíz ( $Cd_{aéreo}/Cd_{raíz}$ ) mostró al tratamiento con 7.5 % de ME con el mayor valor de esta relación (0.248); un valor inferior a la unidad, lo cual indica que el Cd absorbido se acumula en la raíz de maíz. Este tratamiento no tuvo diferencias significativas con los demás tratamientos.

En un trabajo similar donde se comparó nueve especies de cultivo, incluyendo maíz, en Polonia fue *Beta vulgaris* y no *Zea mays* la que tuvo mayor relación de concentración de Cd Tallos/raíces) (21), atribuyéndose la eficiencia de fitorremediación a la producción de biomasa y la posibilidad de acumulación en los órganos cosechables. Esto demuestra que el maíz es una especie más bien fitoestabilizadora antes que fitoextractora de Cd del suelo y los ME no modificarían esta característica.

En el crecimiento de maíz, se observó que los ME incrementaron la altura de planta, la materia seca aérea, la longitud de raíz y la masa seca radicular, con diferentes dosis para cada caso. El tratamiento con 5 % de ME incrementó significativamente la altura de planta y la

materia seca aérea; mientras que el tratamiento con 2.5 % de ME incrementó la longitud de raíz de maíz, pero sin diferencias significativas con los demás tratamientos; similar efecto tuvo el tratamiento con 10 % de ME en la materia seca radicular.

Este efecto se puede sustentar, indicando que los microorganismos eficaces aplicados al suelo, mejoran las propiedades del suelo, promueven la germinación de semillas, y favorecen el crecimiento de la planta, además que mejoran la estructura del suelo, en suelos contaminados (64).

El contenido final de Cd en el suelo fue menor con la dosis de 10 % de microorganismos eficaces y mayor con el tratamiento sin aplicación de ME, mostrando el efecto de los ME en reducir la concentración de Cd en el suelo, teniendo al maíz como planta indicadora. Estos datos no fueron diferentes significativamente respecto a los demás tratamientos.

La presencia de microorganismos en el suelo reduce la concentración de Cd en el suelo, como lo demostró la aplicación de un consorcio de cepas promisorias en suelos contaminados con metales, siendo los más efectivos el consorcio: *Achromobacter denitrificans*, *Klebsiella oxytoca*, y *Rhizobium radiobacter*, reduciendo un 25 % de Cd en el suelo (27). Este dato explica el resultado obtenido en este experimento, donde se redujo la concentración de Cd en el suelo en un 23.48 % con la dosis de 10 % de microorganismos eficientes. El papel que se le atribuye a los microorganismos en el suelo, es el de la absorción de metales pesados (27).

Otro factor para tener en cuenta en los resultados obtenidos, es la combinación de tratamientos que favorezcan la acción de los microorganismos agregados y presentes en el suelo, como es el caso del tratamiento electrocinético; pues en un experimento donde se combinó ME con tratamiento electrocinético se logró una eficiencia de remoción de Cd del suelo, superior a 70 % (26), debido a que el tratamiento electrocinético favoreció la concentración de Cd soluble para la absorción por los microorganismos, pues el Cd normalmente en el suelo es de lento movimiento y generalmente está adsorbido a los sólidos del suelo, y se dificulta su extracción o remoción (43).

Los datos encontrados en este experimento también se relacionan con la investigación realizada en el distrito de San Jerónimo (Cusco), donde al aplicar ME (0 a 20 %), en un suelo contaminado con Cd, durante 60 días, pero las concentraciones finales de Cd fueron menores que la concentración inicial, pero no significativas (17).

Esto permite inferir que es necesario experimentar dosis más cercanas de ME aplicadas al suelo (0, 2, 4, 6, 8, 10), en diferentes tipos de suelos contaminados, pues a diferencia de Cusco, en el caso del presente experimento se utilizó al maíz como planta que podría absorber el Cd soluble y por un periodo experimental más largo, pero con resultados no significativos, sugiriéndose utilizar plantas que prosperen en suelos contaminados, que no sean cultivadas; lo que si se presentó con *Sonchus arvensis*, que es una maleza. Además, combinar técnicas que faciliten la desorción o incremento de Cd soluble en el suelo (por ejemplo, la electrocinética), para su absorción por las raíces de las plantas, microorganismos, y de esa manera se disminuya la concentración de Cd en el suelo contaminado a valores inferiores al ECA de suelos.

## CONCLUSIONES

1. Las concentraciones de microorganismos eficientes afectaron los factores de bioconcentración (FBC) y traslocación (FT) de la siguiente manera:
  - 1.1 La dosis de 10 % de microorganismos eficientes (ME) incrementó el FBC de Cd en maíz, tanto para la parte aérea, radicular y total, pero sin diferencias significativas.
  - 1.2 Los valores del FBC fueron menores que la unidad, indicando que *Zea mays* L. no se comporta como una planta fitoextractora de Cd.
  - 1.3 El factor de traslocación (FT) de cadmio para maíz fue superior con 9 % de ME, sin diferencias significativas con los demás tratamientos, incluyendo el tratamiento sin aplicación de ME.
  - 1.4 Los valores del FT fueron inferiores a la unidad, mostrando que esta especie ensayada es fitoestabilizadora de Cd, acumulando el metal absorbido en la raíz.
2. Sobre el efecto de las concentraciones de ME en el crecimiento de *Zea mays* L.
  - 2.1 Los ME incrementaron significativamente la altura de planta y materia seca aérea de maíz a la dosis de 5 %, atribuible a las mejoras en las propiedades del suelo.
  - 2.2 No se observó diferencias significativas en la longitud de raíz y materia seca radicular, debido a la aplicación de ME.
3. El contenido de Cd en el suelo de Sincos disminuyó en un 23.48 % con el tratamiento de 10 % de ME, sin diferencias significativas con los demás tratamientos.

## **RECOMENDACIONES**

1. Evaluar el efecto de los ME junto con otras técnicas de remediación de suelos, como por ejemplo, electrocinética y cultivo de la tierra, con el fin de facilitar la desorción del Cd del suelo y facilitar su extracción.
2. Ensayar la aplicación de ME a otros suelos contaminados del valle del Mantaro, considerando que tienen diferentes propiedades, para determinar su efecto a diferentes concentraciones.
3. Utilizar especies que prosperan en suelos contaminados, de mayor tolerancia a condiciones limitantes de crecimiento, por ejemplo, las malezas, para incrementar la descontaminación de los suelos a valores inferiores al ECA correspondiente.

## LSITA DE REFERENCIAS

1. **SIVARAJASEKAR, N.; NAINAMALAI, M.; SIVAMANI, S.; GANESH, M.; RAM, K.; MUTHUSARAVANAN, S.** Comparative modeling of flouride biosorption onto waste *Gossypium hirsutum* seed microwawe-bichar using surface methodology and artificial neutral networks. *IEEE Xplore*. Online. 2018. P. 1631–1635. [Accessed 9 April 2023]. Available from: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8342815>
2. **BASIT, A.; TANVEER, S.; ULLAH, I.; TUL, S.; MOHAMED, H.** Microbe-assisted phytoremediation of environmental pollutants and energy recycling in sustainable agriculture. *Archives of Microbiology*. Online. 2021. Vol. 203, p. 5859–5885. [Accessed 28 May 2023]. Available from: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00203-021-02576-0>
3. **MUTHUSARAVANAN, S.; SIVARAJASEKAR, N.; VIVEK, J.; PARAMASIVAN, T.; NAUSHAD, M.; PRAKASHMARAN, J.; GAYATHRI, V.; AL-DUAIJ, O.** Phytoremediation of heavy metals: mechanisms, methods and emhancements. *Enviornmental Chemistry Letters*. Online. 2018. Vol. 16, p. 1339–1359. [Accessed 9 April 2023]. Available from: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10311-018-0762-3>
4. **GAJIC, G.; MITROVIC, M.; PAVLOVIC, P.** Phytobial remediation by bacteria and fungi. In: PANDEY, V. (ed.), *Assisted Phytoremediation*. Online. Elsevier, 2022. p. 285–344. [Accessed 28 May 2023]. Available from: <https://www.sciencedirect.com/book/9780128228937/assisted-phytoremediation>
5. **GAUR, A.; ADHOLEYA, A.** Prospect of arbuscular mycorrhizal fungi in phytoremediation of heavy metal contaminated soils. *Current Science*. Online. 2004. Vol. 86, no. 4, p. 528–534. [Accessed 28 May 2023]. Available from: <https://www.currentscience.ac.in/Volumes/86/04/0528.pdf>
5. **MUTHUSARAVANAN, S.; SIVARAJASEKAR, N.; VIVEL, J.; NAUSHAD, M.; PRAKASHMARAN, J.; GAYATHRI, V.; AL-DUAIJ, O.** Phytoremediation of heavy metals: mechanisms, methods, and enhancements. *Environmental Chemistry Letters*. Online. 2018. Vol. 16, p. 1339–1359. [Accessed 28 May 2023]. Available from: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10311-018-0762-3>
7. **KUMAR, P.; DUSHENKOV, V.; MOTTO, H.; RASKIN, I.** Phytoextraction – the use of plants to remove heavy – metals from soils. *Environ. Sci. Technol.* Online. 1995. Vol. 29, no. 5, p. 1232–1238. [Accessed 28 May 2023]. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780128031582000151#:~:text=For%20the%20plants%20to%20effectively,allow%20easy%20uptake%20by%20roots.>

8. **TACK, F.; MEERS, E.** Assisted phytoextraction: helping plants to help us. *Elements*. Online. 2010. Vol. 6, no. 6, p. 383–388. [Accessed 28 May 2023]. Available from: <https://pubs.geoscienceworld.org/msa/elements/article-abstract/6/6/383/137870/Assisted-Phytoextraction-Helping-Plants-to-Help-Us?redirectedFrom=fulltext>
9. **GONZALES – CHAVEZ, D.** Recuperación de suelos contaminados con metales pesados utilizando plantas y microorganismos rizosféricos. *Terra Latinoamericana*. Online. 2005. Vol. 23, no. 1, p. 29–37. [Accessed 28 May 2023]. Available from: <https://www.redalyc.org/pdf/573/57323104.pdf>
10. **GLICK, B.** Using soil bacteria to facilitate phytoremediation. *Biotechnology Advances*. Online. 2010. Vol. 28, p. 367–374. [Accessed 28 May 2023]. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/20149857/>
11. **CÓNDOR, A.; GONZÁLES, P.; LOKARE, CH.** Effective microorganisms: Myth or reality? *Rev.peru.biol*. Online. 2007. Vol. 14, no. 2, p. 315–319. [Accessed 30 May 2023]. Available from: <http://www.scielo.org.pe/pdf/rpb/v14n2/a26v14n02>
12. **MUTHUSARAVANAN, S.; SIVARAJASEKAR, N.; VIVEK, J.; PARAMASIVAN, T.; NAUSHAD, M.; PRAKASHMARAN, J.; GAYATHRI, V.; AL-DUALI, O.** Phytoremediation of heavy metals: mechanisms, methods, and enhancements. *Environmental Chemistry Letters*. Online. 2018. P. 1–22. [Accessed 30 May 2023]. Available from: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10311-018-0762-3>
13. **FAGERIA, N.; BALIGAR, V.** *Physiology of crop production*. New York: Food Products Press, 2006. ISBN 978-1-56022-288-0.
14. **SMOLDERS, E.; MERTENS, J.** Cadmium. In: ALLOWAY, B. (ed.), *Heavy Metals in Soils. Trace metals and metalloids in soils and their Bioavailability*. Third. Amsterdam: Springer, 2012. p. 283–312. ISBN 978-94-007-4469-1.
15. **MEJIA, F.** *Eficiencia de los microorganismos efectivos (EM) y bokashi en la recuperación de suelos contaminados con glifosato*. Online. Doctorado. Trujillo: Universidad Nacional de Trujillo, 2005. [Accessed 30 May 2023]. Available from: <http://dspace.unitru.edu.pe/bitstream/handle/UNITRU/5998/Tesis%20Doctorado%20-%20Freddy%20Mej%c3%ada%20Coico.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
16. **GÓMEZ, J.; PALMA, N.** *Efecto de la aplicación de microorganismos eficaces (EM) en suelos contaminados por lixiviados del botadero municipal de Pucallpa, departamento de Ucayali*. Online. Pre Grado. Pucallpa: Universidad Nacional de Ucayali, 2023. [Accessed 30 May 2023]. Available from: [http://repositorio.unu.edu.pe/bitstream/handle/UNU/6236/B5\\_2023\\_UNU\\_INGENIERIA-AMBIENTAL\\_2023\\_T\\_JUAN-GOMEZ\\_ET\\_AL\\_V1.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.unu.edu.pe/bitstream/handle/UNU/6236/B5_2023_UNU_INGENIERIA-AMBIENTAL_2023_T_JUAN-GOMEZ_ET_AL_V1.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
17. **KCANA, H.** *Microorganismos eficientes (EM) en la recuperación de un suelo contaminado con cadmio del distrito de San Jerónimo, Cusco*. Online. Pre Grado. Lima:

- Universidad César Vallejo, 2021. [Accessed 30 May 2023]. Available from: [https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/65679/Kcana\\_PHM-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/65679/Kcana_PHM-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
18. **MARCAS, A.; VICTORIA, M.; MOGROVEJO, E.** *Efecto de microorganismos eficaces y vermicompost en la fitorremediación por *Sonchus arvensis* en un suelo contaminado del distrito de Sincos, Junín, 2021.* Online. Huancayo: Universidad Continental, [no date]. [Accessed 30 May 2023]. Available from: <https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/12167?mode=full>
  19. **LLANOS, E.** *Efecto de la aplicación de microorganismos eficaces en el contenido de cadmio y propiedades fisicoquímicas de un suelo contaminado del distrito de Orcotuna, Concepción, 2017.* Online. Huancayo: Universidad Continental, 2018. [Accessed 30 May 2023]. Available from: [https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/5124/1/IV\\_FIN\\_107\\_TE\\_Llanos\\_Quispe\\_2018.pdf](https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/5124/1/IV_FIN_107_TE_Llanos_Quispe_2018.pdf)
  20. **AHMED, A.; MOHAMED, H.** Effect of microbial inoculation and EDTA on the uptake and translocation of heavy metal by corn and snflower. *Chemosphere*. Online. 2009. Vol. 76, no. 7, p. 893–899. [Accessed 30 May 2023]. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045653509006225>
  21. **SEKARA, A.; PONIEDZIALEK, M.; CIURA, J.; JEDRSZCZYK, E.** Cadmium and lead accumulation and distribution in the organs on nine crops: implications for phytoremediation. *Olish Journal of Environmental Studies*. 2005. Vol. 14, no. 4, p. 509–516.
  22. **ADEWOLE, M.; OYEBANJI, B.; IGBEKELE, K.** Phytoremediation potential of two maize varieties cultivated on metal-particulate-contaminated soil. *Ghana Jnl. Afric.* Online. 2018. Vol. 54, no. 1, p. 38–46. [Accessed 2 June 2023]. Available from: <https://www.ajol.info/index.php/gjas/article/view/189819>
  23. **MURTIC, S.; CIVIC, H.; SIJAHOVIC, E.; ZAHIROVIC, C.; SAHINOVIC, E.; PODRUG, A.** Phytoremediation of soils polluted with heavy metals in the vicinity of the Zenica Steel Mill in Bosnia and Herzegovina: potential for using native flora. *European Journal of Environmental Sciences*. Online. 2021. Vol. 11, no. 1, p. 31–37. [Accessed 2 June 2023]. Available from: <https://ejes.cz/index.php/ejes/article/view/621>
  24. **FAHRUDDIN, F.; TANJUNG, R.** The study of bacteria populations in Phytoremediation of cadmium using *Eichhornia crassipes*. *Journal of Physics*. Online. 2019. Vol. 1341. [Accessed 2 June 2023]. Available from: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1341/2/022019>

25. **NGILANGIL, L.; VILAR, D.** Effective microorganisms as remediation for marginal soil in the Philippines. *Chemical Engineering Transactions*. Online. 2019. P. 253–258. [Accessed 4 June 2023]. Available from: <https://www.aidic.it/cet/20/78/043.pdf>
26. **TSUI, L.; PAUL, A.; CHEN, Y.; TZ-CHI, E.** Potential mechanisms contributing to the high cadmium removal efficiency from contaminated soil by using effective microorganisms as novel electrolyte in electrokinetic remediation applications. *Environmental Research*. Online. 2022. Vol. 215, no. 3. [Accessed 4 June 2023]. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013935122015663>
27. **ATUCHIN, V.; ASYAKINA, L.; SERAZETDINOVA, Y.; FROLOVA, A.; VELICHKOVICH, N.; PROSEKOV, A.** Microorganisms for Bioremediation of soils contaminated with heavy metals. *Microorganisms*. Online. 2023. Vol. 11, no. 864. [Accessed 4 June 2023]. Available from: <https://www.mdpi.com/2076-2607/11/4/864#:~:text=In%20the%20study%2C%20promising%20strains,Rhizobium%20radiobacter%2C%20and%20Pseudomonas%20fluorescens>.
28. **DIACONU, M.; PAVEL, L.; HLIHOR, R.; ROSCA, M.; FERTU, D.; LENZ, M.; CORVINI, Ph and GAVRILESCU, M.** Characterization of heavy metal toxicity in some plants and microorganisms - A preliminary approach for environmental bioremediation. *New Biotechnology*. Online. 2020. Vol. 56, p. 130–139. [Accessed 4 June 2023]. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1871678419300603>
29. **NIES, D.** Efflux-mediated heavy metals resistance in prokaryotes. *FEMS Microbio. Rev.* 2003. Vol. 27, p. 313–339.
30. **THORNTON, I.** Geochemistry of cadmium. In: MISLIN, O.; RAVERA, O. (eds.), *Cadmium in the environment*. Online. Boston, 1986. p. 7–12. [Accessed 4 June 2023]. Available from: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-0348-7238-6\\_1#:~:text=Its%20geochemical%20behavior%20is%20similar,as%20shown%20in%20table%201.&text=Cd%20and%20114Cd%20are%20the%20most%20common](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-0348-7238-6_1#:~:text=Its%20geochemical%20behavior%20is%20similar,as%20shown%20in%20table%201.&text=Cd%20and%20114Cd%20are%20the%20most%20common).
31. **SEBASTIAN, A.; PRASAD, M.** Cadmium minimization in rice. *Agron. Sustain. Dev.* Online. 2014. Vol. 34, p. 155–173. [Accessed 4 June 2023]. Available from: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13593-013-0152-y>
32. **CHEN, H.; TANG, Z.; WANG, P.; ZHAO, F.** Geographical variations of cadmium and arsenic concentrations and arsenic speciation in Chinese rice. *Environ. Pollut.* 2018. Vol. 238, p. 482–490.
33. **KHAN, M.; KHAN, S.; KHAN, A.; ALAM, M.** Soil contamination with cadmium, consequences and remediation using organic amendments. *Sci. Total Environ.* Online. 2017. Vol. 601, p. 1591–1605. [Accessed 4 June 2023]. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969717314341>

34. **SIX, L.; SMOLDERS, E.** Future trends in soil cadmium concentration under current cadmium fluxes to European agricultural soils. *Sci. Total Environ.* Online. 2014. Vol. 485, p. 319–328. [Accessed 4 June 2023]. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969714004495>
35. **TAYLOR, M.; KIM, N.; SMIDT, G.; BUSBY, C.; MCNALLY, S.; ROBINSON, B.; KRATZ, S.; SCHUNG, E.** Trace element contaminants and radioactivity from phospahte fertiliser. In: SCHNUG, E.; DE KOK, L. (eds.), *Phosphorus in Agriculture*. Online. Dordrecht: Springer, 2016. p. 231–266. [Accessed 4 June 2023]. Available from: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-017-7612-7\\_12](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-017-7612-7_12)
36. **HOLMGREN, G.; MEYER, M.; CHANEY, R.; DANIELS, R.** Cadmium, lead, zinc, copper, and nickel in agricultural soils of the united-states-of-America. *J. Environ. Qual.* Online. 1993. Vol. 22, p. 335–348. [Accessed 4 June 2023]. Available from: <https://nature.berkeley.edu/classes/espm-120/Website/Holmgren1993.pdf>
37. **LABO.** Background values for inorganic and organic parameters in soil. In: Working group of the federal states on soil protection (ed.), *Working Group of the Federal States on Soil Protection*. 4. 2017. p. 41.
38. **AKBAR, K.; HALE, W.; HEADLEY, A.; ATHAR, M.** Heavy metal contamination of roadside soils of northern england. *Soil Water Res.I.* Online. 2006. Vol. 1, no. 4, p. 158–163. [Accessed 4 June 2023]. Available from: <https://www.agriculturejournals.cz/pdfs/swr/2006/04/05.pdf>
39. **JOIMEL, S.; CORTET, J.; JOLIVERT, C.; SABY, N.; CHENOT, E.; BRANCHU, P.; CONSALES, J.; LEFORT, C.; MOREL, J.; SCHWARTZ, C.** Physico-chemical characteristics of topsoil for contrasted forest, agricultural, urban, and industrial land uses in France. *Sci. Total En.* Online. 2016. Vol. 545, p. 40–47. [Accessed 4 June 2023]. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S004896971531192X>
40. **BAIZE, D.; STERCKMAN, T.** Of the necessity of knowledge of the natural pedo-geochemical background content in the evaluation of the contamination of soils by trace elements. *Sci. Total Environ.* Online. 2001. Vol. 264, p. 127–139. [Accessed 4 June 2023]. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/11213175/>
41. **GARRET, R.; PORTER, A.; HUNT, P.; LALOR, G.** The presence of anomalous trace element levels in present day Jamican soils and the geochemistry of Late-Miocene or Pliocene phosphorites. *Appl. Gechem.* Online. 2008. Vol. 23, p. 822–834. [Accessed 4 June 2023]. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0883292708000073>
42. **LIU, Y.; XIAO, T.; PERKINS, R.; ZHU, J.; ZHU, Z.; XIONG, Y.; NING, Z.** Geogenic cadmium pollution and potential helath risks, with emphasis on black shale. *J. Gechem.*

- Explor.* Online. 2017. Vol. 176, p. 42–49. [Accessed 4 June 2023]. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0375674216300929>
43. **HE, Z.; XU, H.; ZHU, Y.; YANG, X.; CHEN, G.** Adsorption-desorption characteristics of cadmium in variable charge soils. *J. Environ Sci.* Online. 2005. Vol. 40, p. 805–822. [Accessed 4 June 2023]. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/15792301/>
  44. **BIGALKE, M.; ULRICH, A.; REHMUS, A.; KELLER, A.** Accumulation of cadmium and uranium in arable soils in Switzerland. *Environmental Pollution.* Online. 2017. Vol. 221, p. 85–93. [Accessed 4 June 2023]. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0269749116307990>
  45. **KHAN, M.; KHAN, S.; KHAN, A.; ALAM, M.** Soil contamination with cadmium, consequences and remediation using organic amendments. *Science of the total environment.* Online. 2017. Vol. 601–602, p. 1591–1605. [Accessed 4 June 2023]. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969717314341>
  46. **European Union.** *Cadmium oxide and cadmium metal Part I* Online. Luxembourg, 2007. [Accessed 4 June 2023]. Available from: <https://echa.europa.eu/documents/10162/2f39ec55-4530-48f5-8ed9-31be889229cd>
  47. **ATDSR.** Toxicological profile for cadmium. *Agency for toxic substances and disease registry.* Online. 2012. [Accessed 4 June 2023]. Available from: <https://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp5.pdf>
  48. **BELON, E.; BOISSON, M.; DEPORTES, I.; EGLIN, T.; FEIX, I.; BISPO, A.; GALSOMIES, L.; LEBLOND, S.; GUELLER, C.** An inventory of trace elements inputs to French agricultural soils. *Sci. Total Environ.* Online. 2012. Vol. 15, no. 439, p. 87–95. [Accessed 4 June 2023]. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23063913/>
  49. **BIRKE, M.; REIMANN, C.; RAUCH, U.; LADENBERGER, A.; DEMETRIADES, A.; JAHNE-KLINGBERG, F.; OORTS, K.; GOSAR, M.; DINELLI, E.; HALAMIC, J.; TEAM, G.** GEMAS: cadmium distribution and its sources in agricultural and grazing land soil of Europe - original data versus clr-transformed data. *Journal of Geochemical Exploration.* Online. 2017. Vol. 173, p. 13–30. [Accessed 4 June 2023]. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0375674216303090>
  50. **AZZI, V.; KAZPARD, V.; LARTIGES, B.; KOBEISSI, A.; KANSO, A.; EL SAMRANI, A.** Trace metals in phosphatite fertilizers used in eastern mediterranean countries. *CLEAN - Soil, air, water.* Online. 2016. Vol. 45, no. 1. [Accessed 4 June 2023]. Available from: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/clen.201500988>
  51. **SIX, L.; SMOLDERS, E.** Future trends in soil cadmium concentration under current cadmium fluxes to European agricultural soils. *Science of the Total Environment.* Online.

2014. Vol. 485–486, p. 319–328. [Accessed 4 June 2023]. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969714004495>
52. **SCHUETZE, G.; BECKER, R.; DAEMMGEN, U.; NAGEL, H.; SCHLUTOW, A.; WEIGEL, H.** Risikoabschätzung der Cadmium-Belastung für Mensch und Umwelt infolge der Anwendung von cadmiumhaltigen Düngemitteln. *FAL agricultural research*. Online. 2003. Vol. 2/3, p. 63–170. [Accessed 4 June 2023]. Available from: [https://literatur.thuenen.de/digbib\\_extern/zi030123.pdf](https://literatur.thuenen.de/digbib_extern/zi030123.pdf)
53. **VOGLAR, G.; LESTAN, D.** Solidification/stabilisation of metals contaminated industrial soil from former Zn smelter in Celje, Slovenia, using cement as a hydraulic binder. *J. Hazard Mater.* Online. 2010. Vol. 178, p. 926–933. [Accessed 4 June 2023]. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304389410002116>
54. **BI, X.; FENG, X.; YANG, Y.; QIU, G.; LIA, G.** Quantitative assessment of cadmium emission from zinc smelting and its influences on the surface soils and mosses in Hezhang County, Southwestern China. *Atmos. Environ.* Online. 2006. Vol. 40, p. 4228–4233. [Accessed 4 June 2023]. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1352231006002299>
55. **SMOLDERS, E.; MERTENS, J.** Cadmium. In: ALLOWAY J. (ed.), *Heavy Metals in Soils – Trace Metals and Metalloids in Soils and Their Bioavailability*. 3er. Dordrecht: Springer, 2013. p. 283–299.
56. **BRUEMMER, G.; ZEIEN, H.; HILLER, D.; HORNBERG, V.** Bindungsformen und Mobilität von Cadmium und Blei in Böden. In: Wiesner, J.; Kreysa, J. (eds.), *Beurteilung von Schwermetallen in Boden von Ballungsgebieten: Arsen, Blei und Cadmium*. Frankfurt, 1994. p. 524.
57. **TABELIN, C.; IGARASHI, T.; VILLACORTE-TABELIN, M.; PARK, I.; OPISO, E.; ITO, M.; HIROYOSHI, N.** Arsenic, selenium, boron, lead, cadmium, copper, and zinc in naturally contaminated rocks: a review of their sources, modes of enrichment, mechanisms of release, and mitigation strategies. *Sci. Total Environ.* Online. 2018. Vol. 645, p. 1522–1553. [Accessed 4 June 2023]. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969718325476>
58. **LOGANATHAN, P.; VIGNESWARAN, S.; KANDASAMY, J.; NAIDU, R.** Cadmium sorption and desorption in soils: a review. *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.* Online. 2012. Vol. 42, p. 489–533. [Accessed 4 June 2023]. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1002016020600170>
59. **AHMED, I.; CROUT, N.; YOUNG, S.** Kinetics of Cd sorption, desorption, and fixation by calcite: a long-term radiotracer study. *Geochem. Cosmochim. Acta.* Online. 2008. Vol. 72, p. 1498–1512. [Accessed 4 June 2023]. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016703708000203>

60. **AL HUSSEINI, A.; BECHET, B.; GAUDIN, A.; RUBAN, V.** Trace metal fractionation as a mean to improve on the management of contaminated sediments from runoff water in infiltration basins. *Environ. Technol.* Online. 2013. Vol. 34, p. 1255–1266. [Accessed 4 June 2023]. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24191459/>
61. **NAJAFI, S.; JALALI, M.** Effects of organic acids on cadmium and copper sorption and desorption by two calcareous soils. *Environ. Monit. Assess.* Online. 2015. Vol. 187. [Accessed 4 June 2023]. Available from: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10661-015-4804-z>
62. **PRASAD, N.; BHISHAM, D.; SUMAN, A.** Role of Microorganisms for the Sustainable Use of Soil Pollution Abutment in Agriculture Lands. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences.* Online. 2017. Vol. 6, no. 11, p. 335–350. [Accessed 7 June 2023]. Available from: <https://www.ijemas.com/6-11-2017/Narayan%20Prasad%20Verma,%20et%20al.pdf>
63. **SAFWAT, S.; MATTA, M.** Environmental applications of Effective Microorganisms: a review of current knowledge and recommendations for future directions. *Journal of Engineering and Applied Science.* Online. 2021. Vol. 68, p. 1–12. [Accessed 7 June 2023]. Available from: <https://www.scilit.net/article/9a356a022722164b4068ca94b3a2f3cd?action=show-references>
64. **MOROCHO, M.; LEIVA-MORA, M.** Microorganismos eficientes, propiedades funcionales y aplicaciones agrícolas. *Centro Agrícola.* Online. 2019. Vol. 46, no. 2, p. 93–103. [Accessed 7 June 2023]. Available from: [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0253-57852019000200093](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0253-57852019000200093)
65. **TORRES, A.; QUIPUZCO, L.; MEZA, V.** Influencia de la fermentación láctica (abono *bokashi*) en el pre-compost para la producción de biogás y biol en biodigestores tipo Batch. *Anales Científ.* Online. 2015. Vol. 76, no. 2, p. 269–274. [Accessed 8 June 2023]. Available from: <https://revistas.lamolina.edu.pe/index.php/acu/article/view/791>
66. **SOTO, J.; CÁRDENAS, J.; GARCÍA, J.** Inoculation of substrate with lactic acid bacteria for the development of Moringa oleifera Lam plantlets. *Cuban Journal of Agriculture Science.* Online. 2017. Vol. 51, no. 2, p. 241–247. [Accessed 8 June 2023]. Available from: <http://scielo.sld.cu/pdf/cjas/v51n2/cjas10217.pdf>
67. **SOUZA, R.; AMBROSINI, A.; PASSAGLIA, L.** Plant growth-promoting bacteria as inoculants in agricultural soils. *Genetics and Molecular Biology.* Online. 2015. Vol. 38, no. 4, p. 401–419. [Accessed 8 June 2023]. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26537605/>
68. **LONDOÑO, N.; TABORDA, M.; LÓPEZ, C.; ACOSTA, L.** Bacteriosinas producidas por bacterias ácido lácticas y su aplicación en la industria de alimentos. *Alimentos Hoy.*

- Online. 2015. Vol. 23, no. 36, p. 186–205. [Accessed 8 June 2023]. Available from: <https://alimentos hoy.acta.org.co/index.php/hoy/article/viewFile/356/306>
69. **FEIJOO, M.** Microorganismos eficientes y sus beneficios para los agricultores. *Científica Agroecosistemas*. Online. 2016. Vol. 4, no. 2, p. 31–40. [Accessed 8 June 2023]. Available from: <https://aes.ucf.edu.cu/index.php/aes/article/view/84#:~:text=Los%20Microorganismos%20Eficientes%2C%20como%20inoculante,y%20medio%20ambiente%20m%C3%A1s%20sostenible.>
70. **GAO, Y.; ZHANG, Y.; WEN, X.** The glycerol and ethanol production kinetics in low-temperature wine fermentation using *Saccharomyces cerevisiae* yeast strains. *International Journal of Food Science Technology*. Online. 2019. Vol. 54, no. 1, p. 102–110. [Accessed 8 June 2023]. Available from: <https://ifst.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/ijfs.13910>
71. **FAYEMI, O.; OJOKOH, A.** The effect of different fermentation techniques on the nutrition quality of the cassava product (fufu). *Journal of food processing and preservation*. Online. 2014. Vol. 38, no. 1, p. 183–192. [Accessed 8 June 2023]. Available from: The effect of different fermentation techniques on the nutrition quality of the cassava product (fufu)
72. **MEENA, S.; MEENA, V.** Importance of soil microbes in nutrient use efficiency and sustainable food production. In: *Agricultural Important Microbes for Sustainable Agriculture*. Online. Singapore: Springer, 2017. p. 3–23. [Accessed 8 June 2023]. Available from: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-10-5343-6\\_1#:~:text=Rhizospheric%20microorganisms%20contribute%20significantly%20to,fertility%20status%20of%20agricultural%20soils.](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-10-5343-6_1#:~:text=Rhizospheric%20microorganisms%20contribute%20significantly%20to,fertility%20status%20of%20agricultural%20soils.)
73. **VURUKONDA, S.; GIOVANARDI, D.; STEFANI, E.** Plant growth promoting and biocontrol activity of *Streptomyces* spp. as endophytes. *International Journal of Molecular Sciences*. Online. 2018. Vol. 19, no. 4, p. 952. [Accessed 8 June 2023]. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29565834/>
74. **CHAURASIA, A.; MEENA, B.; TRIPATHI, A.** Actinomycetes: an unexplored microorganism for plant growth promotion and biocontrol in vegetable crops. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*. Online. 2018. Vol. 34, no. 9, p. 132. [Accessed 8 June 2023]. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30105532/>
75. **YANG, Z.; JIANG, Z.; HSE, C.; LIU, R.** Assessing the impact of wood decay fungi on the modulus of elasticity of slash pine (*Pinus elliottii*) by stress wave non-destructive testing. *International Journal of Molecular Sciences*. Online. 2017. Vol. 117, p. 123–127. [Accessed 8 June 2023]. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0964830516308423>

76. **EL-GENDY, M.; AL-ZAHRANI, S.; EL-BONDKLY, A.** Construction of potent recombinant strain through intergeneric protoplast fusion in endophytic fungi for anticancerous enzymes production using rice straw. *Applied Biochemistry and Biotechnology*. Online. 2017. Vol. 183, no. 1, p. 30–50. [Accessed 8 June 2023]. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28205049/>
77. **HORWATH, W.** The role of the soil microbial biomass in cycling nutrients. In: *Microbial Biomass: A Paradigm Shift in Terrestrial Biogeochemistry*. Online. 2017. p. 41–66. [Accessed 8 June 2023]. Available from: [https://www.researchgate.net/publication/313456381\\_The\\_Role\\_of\\_the\\_Soil\\_Microbial\\_Biomass\\_in\\_Cycling\\_Nutrients\\_A\\_Paradigm\\_Shift\\_in\\_Terrestrial\\_Biogeochemistry](https://www.researchgate.net/publication/313456381_The_Role_of_the_Soil_Microbial_Biomass_in_Cycling_Nutrients_A_Paradigm_Shift_in_Terrestrial_Biogeochemistry)
78. **SHARMA, P.** Efficiency of bacteria and bacterial assisted phytoremediation of heavy metals: An update. *Bioresource Technology*. Online. 2021. Vol. 328. [Accessed 8 June 2023]. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852421001747>
79. **WANG, L.; HOU, D.; SHEN, Z.; JIA, X.; OK, Y.; TACK, F.; RINKLEBE, J.** Field trials of phytomining and Phytoremediation: A critical review of influencing factors and effects of additives. *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.* Online. 2020. Vol. 50, no. 24, p. 2724–2774. [Accessed 8 June 2023]. Available from: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10643389.2019.1705724?journalCode=best20>
80. **ASHRAF, S.; ALI, Q.; ZAHIR, Z.; ASHRAF, S.; ASGHAR, H.** Phytoremediation: environmentally sustainable way for reclamation of heavy metal polluted soils. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* Online. 2019. Vol. 174, p. 714–727. [Accessed 8 June 2023]. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0147651319302271>
81. **ZGORELEC, Z.; BILANDZIJA, N.; KNEZ, K.; GALIC, M.; ZUZUL, S.** Cadmium and mercury phytostabilization from soil using *Miscanthus x giganteus*. *Sci. Rep.* Online. 2020. Vol. 10. [Accessed 9 June 2023]. Available from: <https://www.nature.com/articles/s41598-020-63488-5>
82. **ZHOU, J.; ZHOU, T.; LI, Z.; WU, L.; LUO, Y.; CHRISTIE, P.** Differences in phytoextraction by the cadmium and zinc hyperaccumulator *Sedum plumbizincicola* in greenhouse, polytunnel and field conditions. *Int. J. Phytoremediat.* Online. 2018. Vol. 20, p. 1400–1407. [Accessed 9 June 2023]. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30652504/>
83. **MONACI, F.; TRIGUEROS, D.; MONGORANCE, M.; ROSSINI-OLIVA, S.** Phytostabilization potential of *Erica australis* L.; *Nerium oleander* L.: a comparative study in the Riotinto mining area (SW Spain). *Environ Geochem. Health.* Online. 2020. Vol. 42, p. 2345–2360. [Accessed 9 June 2023]. Available from:

<https://link.springer.com/article/10.1007/s10653-019-00391-7>

84. **TAREKEGN, M.; SALILIH, Z.; ISHETU, A.** Microbes used as a tool for bioremediation of heavy metal from the environment. *Cogent Food Agric.* Online. 2020. Vol. 6, no. 1. [Accessed 9 June 2023]. Available from:  
<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/23311932.2020.1783174>
85. **CAMERON, H.; MATA, M.; RIQUELME, C.** The effect of heavy metals on the viability of *Tetraselmis marina* AC16-MESO and an evaluation of the potential use of this microalga in bioremediation. *PeerJ.* Online. 2018. Vol. 6. [Accessed 9 June 2023]. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30065883/>
86. **DE ALENCAR, F.; NAVONI, J.; AMARAL, V.** The use of bacterial bioremediation of metals in aquatic environments in the twenty-first century: a systematic review. *Environ. Sci. Pollut. Res.* Online. 2017. Vol. 24, p. 16545–16559. [Accessed 9 June 2023]. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28540556/>
87. **SIDDIQUEE, S.; ROVINA, K.; AZAD, S.; NAHER, L.; SURYANI, S.; CHAIKAEW, P.** Heavy Metal Contaminants Removal from Wastewater Using the Potential Filamentous Fungi Biomass: A Review. *J. Microb. Biochem. Technol.* Online. 2015. Vol. 7, no. 6, p. 384–393. [Accessed 9 June 2023]. Available from:  
[https://www.researchgate.net/publication/288856858\\_Heavy\\_Metal\\_Contaminants\\_Removal\\_from\\_Wastewater\\_Using\\_the\\_Potential\\_Filamentous\\_Fungi\\_Biomass\\_A\\_Review](https://www.researchgate.net/publication/288856858_Heavy_Metal_Contaminants_Removal_from_Wastewater_Using_the_Potential_Filamentous_Fungi_Biomass_A_Review)
88. **JASROTIA, S.; KANSAL, A.; MEHRA, A.** Performance of aquatic plant species for phytoremediation of arsenic-contaminated water. *Appl. Water Sci.* Online. 2017. Vol. 7, p. 889–896. [Accessed 9 June 2023]. Available from:  
<https://link.springer.com/article/10.1007/s13201-015-0300-4>
89. **JEYAKUMAR, P.; DEBNATH, Ch.; VIJAYARAGHAVAN, R.; MUTHURAJ, M.** Trends in Bioremediation of Heavy Metal Contaminations. *Environ. Eng. Res.* Online. 2023. Vol. 28, no. 4. [Accessed 9 June 2023]. Available from:  
<https://www.eeer.org/journal/view.php?number=1441>
90. **PRIYADARSHANEE, M.; DAS, S.** Biosorption and removal of toxic heavy metals by metal tolerating bacteria for bioremediation of metal contamination: A comprehensive review. *J. Environ. Chem. Eng.* 2021. Vol. 9.
91. **MUSTAPHA, M.; HALIMOON, N.** Microorganisms and Biosorption of Heavy Metals in the Environment: A Review Paper. *J. Microb. Biochem. Technol.* Online. 2015. Vol. 7, p. 253–256. [Accessed 9 June 2023]. Available from:  
<https://www.walshmedicalmedia.com/open-access/microorganisms-and-biosorption-of-heavy-metals-in-the-environment-a-review-paper-1948-5948-1000219.pdf>

92. **VELASQUEZ, L.; DUSSAN, J.** Biosorption and bioaccumulation of heavy metals on dead and living biomass of *Bacillus sphaericus*. *J. Hazard. Mater.* Online. 2019. Vol. 167, p. 713–716. [Accessed 9 June 2023]. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/19201532/>
93. **NASCIMENTO, C.; XING, B.** Phytoextraction: A review on enhanced metal availability and plant accumulation. *Sci. Agric. (Piracicaba, Braz.)*. Online. 2006. Vol. 63, no. 3, p. 299–311. [Accessed 9 June 2023]. Available from: <https://www.scielo.br/j/sa/a/t9XQw679VKj7z4TSzcsVYzs/?lang=en#:~:text=The%20aim%20of%20phytoextraction%20is,of%20the%20site%20being%20remediated.>
94. **WUANA, R.; OKIEIMEN, F.** «Phytoremediation Potential of Maize (*Zea mays* L.)», A Review. *African Journal of General Agriculture*. Online. 2010. Vol. 6, no. 4. [Accessed 9 June 2023]. Available from: [https://www.researchgate.net/publication/266461659\\_Phytoremediation\\_Potential\\_of\\_Maize\\_Zea\\_mays\\_L\\_A\\_Review](https://www.researchgate.net/publication/266461659_Phytoremediation_Potential_of_Maize_Zea_mays_L_A_Review)
95. **IBRAHIMPASIC, J.; JOGIC, V.; DZAFERVIC, A.; TOROMANOVIC, M.; DEDIC, S.** The potential of corn (*Zea mays* L.) for phytoremediation of soil contaminated with heavy metals. *Technologica Acta*. Online. 2021. Vol. 14, no. 2, p. 31–38. [Accessed 9 June 2023]. Available from: [https://www.researchgate.net/publication/225285964\\_The\\_Potential\\_of\\_Corn\\_Zea\\_mays\\_for\\_Phytoremediation\\_of\\_Soil\\_Contaminated\\_with\\_Cadmium\\_and\\_Lead](https://www.researchgate.net/publication/225285964_The_Potential_of_Corn_Zea_mays_for_Phytoremediation_of_Soil_Contaminated_with_Cadmium_and_Lead)
96. **Ministerio del Ambiente.** *Glosario de términos. Sitios Contaminados* Online. Lima, 2016. [Accessed 9 June 2023]. Available from: <https://www.minam.gob.pe/calidadambiental/wp-content/uploads/sites/22/2015/02/2016-05-30-Conceptos-propuesta-Glosario.pdf>
97. **CAMACHO, A.; ARIOS, L.** *Diccionario de términos ambientales* Online. La Habana, 2000. [Accessed 9 June 2023]. Available from: [https://biblio.colsan.edu.mx/arch/especi/lc\\_otro\\_007.pdf](https://biblio.colsan.edu.mx/arch/especi/lc_otro_007.pdf)
98. **Junta de Andalucía.** *Vocabulario básico de ecología y medio ambiente* Online. 2005. [Accessed 9 June 2023]. Available from: <https://andalucia.ccoo.es/1963b956ac7772d3620a7bf9e163583a000057.pdf>
99. **BERNAL, C.** *Metodología de la investigación*. Online. Tercera. Bogotá: Pearson, 2016. [Accessed 9 June 2023]. Available from: [https://www.academia.edu/44228601/Metodologia\\_De\\_La\\_Investigaci%C3%B3n\\_Bernal\\_4ta\\_edicion](https://www.academia.edu/44228601/Metodologia_De_La_Investigaci%C3%B3n_Bernal_4ta_edicion)
100. **PAEZ, W.** *El plan de tesis*. Online. Lima: Olgraf, 2013. [Accessed 9 June 2023]. Available from: <https://es.scribd.com/doc/278797597/El-Plan-Tesis>

101. **FERNÁNDEZ, C.; BAPTISTA, P.; HERNÁNDEZ, R.** *Metodología de la investigación*. Online. Sexta. México: Mc Graw Hill, 2014. [Accessed 9 June 2023]. Available from: <https://www.uca.ac.cr/wp-content/uploads/2017/10/Investigacion.pdf>
102. **DI RIENZO, J.; CASANOVES, F.; BALZARINI, M.; GONZÁLES, L.** *Infostat versión 2020*. Online. Córdoba: FCA, 2020. [Accessed 9 June 2023]. Available from: <http://www.infostat.com.ar>
103. **STEEL, R.; TORRIE, J.** *Bioestadística: Principios y Procedimientos*. Online. Bogotá: Mc Graw-Hill, 1985. [Accessed 9 June 2023]. Available from: [https://www.academia.edu/35066774/Steel\\_Robert\\_G\\_Bioestadistica\\_Principios\\_Y\\_Procedimientos\\_2ed](https://www.academia.edu/35066774/Steel_Robert_G_Bioestadistica_Principios_Y_Procedimientos_2ed)
104. **HAVLIN, J.; TISDALE, S.; NELSON, W.; BEATON, J.** *Soil Fertility and Fertilizers. An Introduction to nutrient Management*. Pearson. 2014. ISBN-13: 978-0-13-503373-9.

## **ANEXOS**

## Anexo 1. Resultado del análisis físico químico del suelo



**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA**  
 FACULTAD DE AGRONOMIA - DEPARTAMENTO DE SUELOS  
 LABORATORIO DE ANALISIS DE SUELOS, PLANTAS, AGUAS Y FERTILIZANTES



### ANALISIS DE SUELOS : CARACTERIZACION

Solicitante : NOEMÍ SILVIA HINOSTROZA HUANUCO

Departamento : JUNÍN

Distrito : SINCOS

Referencia : H.R. 77602-141C-22

Bolt.: 5329

Provincia : JAUJA

Predio :

Fecha : 20/09/2022

Número de Muestra		pH (1:1)	C.E. (1:1) dS/m	CaCO <sub>3</sub> %	M.O. %	P ppm	K ppm	Análisis Mecánico			Clase Textural	CIC	Cationes Cambiables					Suma de Cationes	Suma de Bases	% Sat. De Bases
Lab	Claves							Arena	Limo	Arcilla			Ca <sup>+2</sup>	Mg <sup>+2</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Al <sup>+3</sup> + H <sup>+</sup>			
								%	%	%			meq/100g							
11991	SUELO	7.83	0.80	10.28	2.82	30.6	232	52	36	12	Fr.	11.68	8.14	2.91	0.59	0.04	0.00	11.68	11.68	100

A = Arena ; A.Fr. = Arena Franca ; Fr.A. = Franco Arenoso ; Fr. = Franco ; Fr.L. = Franco Limoso ; L = Limoso ; Fr.Ar.A. = Franco Arcillo Arenoso ; Fr.Ar. = Franco Arcilloso ; Fr.Ar.L. = Franco Arcillo Limoso ; Ar.A. = Arcillo Arenoso ; Ar.L. = Arcillo Limoso ; Ar. = Arcilloso

Número de Muestra		Cd ppm	CC %	PM %
Lab.	Claves			
11991	SUELO	0.02	23.50	13.12



*Dr. Constantino Calderón Mendoza*  
 Jefe del Laboratorio

## METODOS SEGUIDOS EN EL ANALISIS DE SUELOS

1. Textura de suelo. % de arena, limo y arcilla; método del hidrómetro.
2. Salinidad, medida de la conductividad eléctrica (CE) del extracto acuoso en la relación suelo: agua 1:1 o en el extracto de la pasta de saturación(es).
3. PH: medida en el potenciómetro de la suspensión suelo: agua relación 1:1 o en suspensión suelo: KCl N, relación 1:2.5.
4. Calcareao total (CaCO<sub>3</sub>): método gaso-volumétrico utilizando un calcímetro.
5. Materia orgánica: método de Walkley y Black, oxidación del carbono orgánico con dicromato de potasio. %M.O.= %Cx1.724.
6. Nitrogeno total: método del micro-Kjeldahl.
7. Fósforo disponible: método del Olsen modificado, extracción con NaHCO<sub>3</sub>=0.5M, pH 8.5
8. Potasio disponible: extracción con acetato de amonio (CH<sub>3</sub> - COONH<sub>4</sub>)N, pH 7.0
9. Capacidad de intercambio catiónico (CIC): saturación con acetato de amonio (CH<sub>3</sub> - COOCH<sub>3</sub>)N; pH 7.0
10. Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup> cambiabiles: reemplazamiento con acetato de amonio

(CH<sub>3</sub> - COONH<sub>4</sub>)N; pH 7.0 cuantificación por fotometría de llama y/o absorción atómica.

11. Al<sup>3+</sup> H<sup>+</sup>: método de Yuan. Extracción con KCl. N

12. Iones solubles:

- a) Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup> solubles: fotometría de llama y/o absorción atómica.
- b) Cl, Co<sub>3</sub>=, HCO<sub>3</sub>=, NO<sub>3</sub> solubles: volumetría y colorimetría. SO<sub>4</sub> turbidimetría con cloruro de Bario.
- c) Boro soluble: extracción con agua, cuantificación con curcumina.
- d) Yeso soluble: solubilización con agua y precipitación con acetona.

**Equivalencias:**

1 ppm=1 mg/kilogramo

1 milimho (mmho/cm) = 1 deciSiemens/metro

1 miliequivalente / 100 g = 1 cmol(+)/kg

Sales solubles totales (TDS) en ppm ó mg/kg = 640 x CEes

CE (1 : 1) mmho/cm x 2 = CE(es) mmho/cm

## TABLA DE INTERPRETACION

Salinidad		Materia Orgánica	Fósforo disponible	Potasio disponible	Relaciones Catiónicas			
Clasificación del Suelo	CE(es)	CLASIFICACIÓN	%	ppm P	ppm K	Clasificación	K/Mg	Ca/Mg
*muy ligeramente salino	<2	*bajo	<2.0	<7.0	<100	*Normal	0.2 - 0.3	5 - 9
*ligeramente salino	2 - 4	*medio	2 - 4	7.0 - 14.0	100 - 240	*defc. Mg	>0.5	
*moderadamente salino	4 - 8	*alto	>4.0	>14.0	>240	*defc. K	>0.2	
*fuertemente salino	>8					*defc. Mg		>10

Reacción o pH		CLASES TEXTURALES				Distribución de Cationes %												
Clasificación del Suelo	pH	A	A.Fr	Fr.A	Fr.	Fr.L.	L	Fr.Ar.A	Fr.Ar	Fr.Ar.L	Ar.A	Ar.L.	Ar.	Ca <sup>2+</sup>	mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	
*fuertemente ácido	<5.5	= arena	= arena franca	= franco arenoso	= franco	= franco limoso	= limoso	= franco arcillo arenoso	= franco arcilloso	= franco arcilloso limoso	= arcilloso arenoso	= arcilloso limoso	= arcilloso	=	=	=	=	60 - 75
*moderadamente ácido	5.6 - 6.0																	15 - 20
*ligeramente ácido	6.1 - 6.5																	3 - 7
*neutro	6.6 - 7.0																	<15
*ligeramente alcalino	7.1 - 7.8																	
*moderadamente alcalino	7.9 - 8.4																	
*fuertemente alcalino	>8.5																	

**Anexo 2. Resultado del análisis inicial de Cd en el suelo.**

	<p><b>UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA</b> FACULTAD DE AGRONOMIA LABORATORIO DE ANALISIS DE SUELOS, PLANTAS, AGUAS Y FERTILIZANTES</p>									
<b>INFORME DE ANALISIS ESPECIAL EN SUELO</b>										
SOLICITANTE :	NOEMI SILVIA HINOSTROZA HUANUCO									
PROCEDENCIA :	JUNIN/ JAUJA/ SINCOS									
REFERENCIA :	H.R. 77974									
BOLETA :	5402									
FECHA :	7/10/2022									
<table border="1" data-bbox="467 766 873 871"><thead><tr><th colspan="2">Número Muestra</th><th rowspan="2">Cd Total ppm</th></tr><tr><th>Lab</th><th>Claves</th></tr></thead><tbody><tr><td>2293</td><td></td><td>9.00</td></tr></tbody></table>			Número Muestra		Cd Total ppm	Lab	Claves	2293		9.00
Número Muestra		Cd Total ppm								
Lab	Claves									
2293		9.00								
										
<p><i>Constantino Calderón Mendoza</i> Jefe del Laboratorio</p>										
<hr/> <p>Av. La Molina s/n Campus UNALM Telf.: 614-7800 Anexo 222 Teléfono Directo: 349-5622 e-mail: labsuelo@lamolina.edu.pe</p>										

### Anexo 3. Resultado del análisis de Cd en la parte aérea



**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA**  
FACULTAD DE AGRONOMIA  
LABORATORIO DE ANALISIS DE SUELOS, PLANTAS, AGUAS Y FERTILIZANTES



### INFORME DE ANALISIS ESPECIAL EN FOLIAR

SOLICITANTE : NOEMI SILVIA HINOSTROZA HUANUCO  
PROCEDENCIA : JUNIN/ JAUJA/ SINCOS/ LUGAR SINCOS  
MUESTRA : HOJAS  
REFERENCIA : H.R. 78365  
FACTURA : 5471  
FECHA : 29/11/2022

N. Lab.	CLAVE DE CAMPO	Cd ppm
3799	T1R1-M-H	1.15
3800	T1R2-M-H	1.03
3801	T1R3-M-H	0.95
3802	T2R1-M-H	0.90
3803	T2R2-M-H	1.09
3804	T2R3-M-H	1.28
3805	T3R1-M-H	1.10
3806	T3R2-M-H	0.93
3807	T3R3-M-H	1.28
3808	T4R1-M-H	1.30
3809	T4R2-M-H	1.28
3810	T4R3-M-H	1.33
3811	T5R1-M-H	1.20
3812	T5R2-M-H	1.40
3813	T5R3-M-H	1.33



*Constantino Calderón Mendoza*  
Jefe de Laboratorio

---

Av. La Molina s/n Campus UNALM  
Telf.: 614-7800 Anexo 222 Teléfono Directo: 349-5622  
Celular: 946-505-254  
e-mail: labsuelo@lamolina.edu.pe

#### Anexo 4. Resultado del análisis de Cd en la parte radicular.



**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA**  
FACULTAD DE AGRONOMIA  
LABORATORIO DE ANALISIS DE SUELOS, PLANTAS, AGUAS Y FERTILIZANTES



### INFORME DE ANALISIS ESPECIAL EN FOLIAR

SOLICITANTE : NOEMI SILVIA HINOSTROZA HUANUCO  
PROCEDENCIA : JUNIN/ JAUJA/ SINCOS/ LUGAR SINCOS  
MUESTRA : RAICES  
REFERENCIA : H.R. 78366  
FACTURA : 5471  
FECHA : 29/11/2022

N. Lab.	CLAVE DE CAMPO	Cd ppm
3814	T1R1-M-R	6.20
3815	T1R2-M-R	6.33
3816	T1R3-M-R	6.75
3817	T2R1-M-R	6.45
3818	T2R2-M-R	6.03
3819	T2R3-M-R	5.85
3820	T3R1-M-R	5.75
3821	T3R2-M-R	4.93
3822	T3R3-M-R	4.55
3823	T4R1-M-R	7.10
3824	T4R2-M-R	5.53
3825	T4R3-M-R	4.00
3826	T5R1-M-R	7.90
3827	T5R2-M-R	7.58
3828	T5R3-M-R	4.53



*Dr. Constantino Calderón Mendoza*  
Jefe de Laboratorio

---

Av. La Molina s/n Campus UNALM  
Telf.: 614-7800 Anexo 222 Teléfono Directo: 349-5622  
Celular: 946-505-254  
e-mail: labsuelo@lamolina.edu.pe

## Anexo 5. Resultado del análisis final de Cd en el suelo.



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA  
FACULTAD DE AGRONOMIA  
LABORATORIO DE ANALISIS DE SUELOS, PLANTAS, AGUAS Y FERTILIZANTES



### INFORME DE ANALISIS ESPECIAL EN SUELO

SOLICITANTE : NOEMI SILVIA HINOSTROZA HUANUCO  
PROCEDENCIA : JUNIN/ JAUJA/ SINCOS/ LUGAR SINCOS  
REFERENCIA : H.R. 78364  
BOLETA : 5471  
FECHA : 15/12/2022

Lab	Número Muestra		Cd ppm
	Claves		
3124	T1R1-M		6.51
3125	T1R2-M		7.17
3126	T1R3-M		7.42
3127	T2R1-M		7.19
3128	T2R2-M		5.98
3129	T2R3-M		7.73
3130	T3R1-M		6.79
3131	T3R2-M		6.76
3132	T3R3-M		7.11
3133	T4R1-M		6.65
3134	T4R2-M		7.08
3135	T4R3-M		7.68
3136	T5R1-M		6.37
3137	T5R2-M		6.43
3138	T5R3-M		6.65

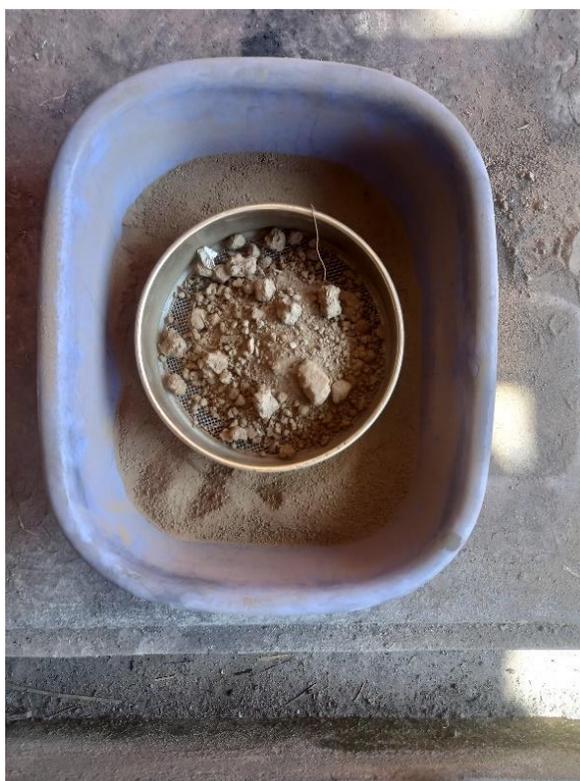


*Constantino Calderón Mendoza*  
Jefe del Laboratorio

## Anexo 6. Galería fotográfica



*Figura 8. Parcela agrícola de Sincos contaminada con Cd. Coordenadas UTM: 457652/8686100; 457595/8686156; 457709/8686150; 457666/8686200. Altitud: 3323 m s. n. m.*



*Figura 9. Tamizado de la muestra de suelo*



*Figura 10. Pesado del suelo contaminado de Sincos*



*Figura 11. Cinco tratamiento y tres repeticiones del experimento*



*Figura 12. Emergencia del maíz*



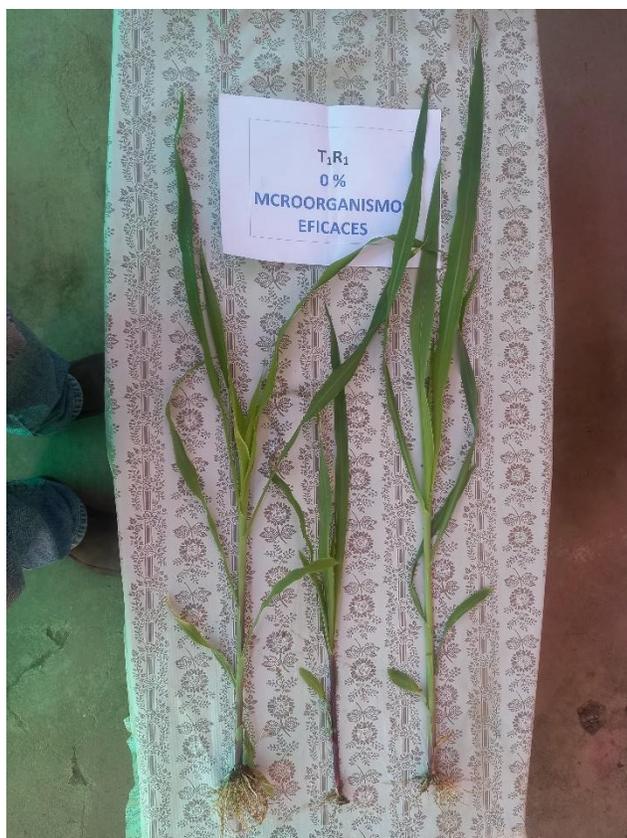
*Figura 13. Crecimiento de maíz*



*Figura 14. Crecimiento de maíz*



*Figura 15. Cultivo de maíz antes de la cosecha*



*Figura 16. Tratamiento 1 al final del experimento*



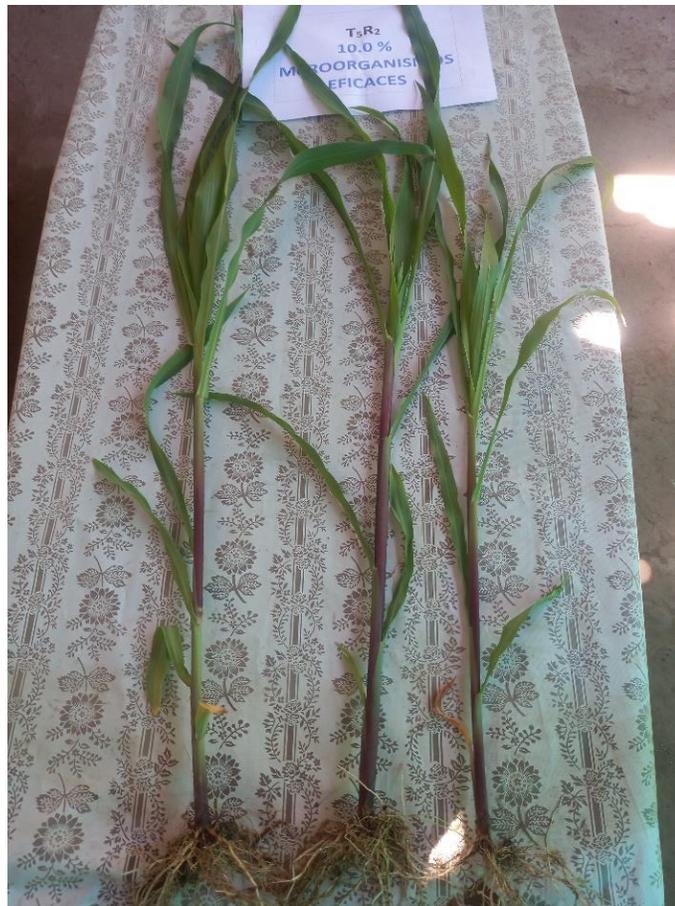
*Figura 17. Tratamiento 2 al final del experimento*



*Figura 18. Tratamiento 3 al final del experimento*



*Figura 19. Tratamiento 4 al final del experimento*



*Figura 20. Tratamiento 5 al final del experimento*