

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

Escuela Académico Profesional de Ingeniería Ambiental

Tesis

**Efecto de enmiendas orgánicas en la fitorremediación  
con *Zea mays l.* en un suelo contaminado con cadmio.  
Leonor Ordoñez, Jauja - 2021**

Anderson Anibal Poma Jimenez  
Ciro Elias Quiñonez Rojas

Para optar el Título Profesional de  
Ingeniero Ambiental

Huancayo, 2022

Repositorio Institucional Continental  
Tesis digital



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

## **AGRADECIMIENTOS**

En primera instancia agradecemos a Dios por guiarnos durante esta etapa profesional; además por la fortaleza, salud y bendición que nos brindó en momentos difíciles a lo largo de nuestras vidas.

A nuestro asesor, el Dr. Andrés A. Azabache Leyton, por su asesoría, orientación y apoyo constante en el desarrollo del trabajo de investigación.

A la plana de docentes de la Escuela Académico Profesional de Ingeniería Ambiental de la Universidad Continental, quienes nos inculcaron los conocimientos necesarios para la realización del trabajo de investigación.

Al Programa Nacional de Becas y Crédito Educativo (Pronabec), por el programa de Beca 18, por brindarnos la oportunidad de poder concluir con nuestros estudios universitarios, y además por el apoyo incondicional en el proceso de elaboración de la tesis profesional para optar el grado de ingenieros.

A los agricultores del distrito de Leonor Ordoñez, por brindarnos las facilidades de sus terrenos para la adquisición de muestras de suelo.

A nuestras familias, por el apoyo incondicional y consejos que en todo momento nos han brindado.

## **DEDICATORIA**

A mi querido tío, Efraín Rojas Bastidas; y a mi querida madre, Aydee Rojas Bastidas, por su enorme apoyo y sacrificio para culminar mi carrera; a mi abuela y mi tía por el apoyo y motivación incondicional.

**Ciro**

A mi amada madre, Carmen Jimenez Chuco, por haber confiado en mí, por su apoyo invaluable y por motivarme a superar los retos de la profesión, y a mi familia por su cariño incondicional

**Anderson**

# ÍNDICE GENERAL

Agradecimientos.....	ii
Dedicatoria .....	iii
Índice general.....	iv
Índice de tablas .....	viii
Índice de figuras .....	x
Resumen.....	xi
Abstract.....	xii
Introducción.....	xiii
<b>CAPÍTULO I.....</b>	<b>16</b>
<b>PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO .....</b>	<b>16</b>
1.1 Planteamiento y formulación del problema.....	16
1.1.1 Planteamiento del problema .....	16
1.1.2 Formulación del problema.....	19
1.1.2.1 Problema general .....	19
1.1.2.2 Problemas específicos.....	19
1.2 Objetivos .....	20
1.2.1 Objetivo general .....	20
1.2.2 Objetivos específicos .....	20
1.3 Justificación e importancia .....	20
1.3.1 Ambiental .....	20
1.3.2 Social .....	21
1.3.3 Económico .....	21
1.4 Hipótesis y descripción de variables .....	21
1.4.1 Hipótesis general .....	21
1.4.2 Hipótesis específicas .....	21
1.4.3 Operacionalización de variables .....	22
1.4.3.1 Variable dependiente.....	22
1.4.3.2 Variable independiente .....	22
<b>CAPÍTULO II.....</b>	<b>24</b>
<b>MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>24</b>
2.1. Antecedentes del problema .....	24

2.1.1. Antecedentes internacionales .....	24
2.1.2. Antecedentes nacionales .....	29
2.2. Bases teóricas .....	33
2.2.1. Contaminación del suelo .....	33
2.2.1.1. Principales contaminantes del suelo.....	34
2.2.1.2. Actividades industriales como fuentes de contaminación .....	37
2.2.2. Metales pesados en el sistema suelo.....	40
2.2.2.1. Dinámica de los metales pesados en el suelo .....	41
2.2.2.2. Disponibilidad de los metales en el suelo .....	44
2.2.2.3. Toxicidad .....	47
2.2.3. El cadmio en el suelo .....	48
2.2.3.1. Fuentes de exposición del cadmio.....	49
2.2.3.2. Disponibilidad del cadmio .....	51
2.2.3.3. Toxicidad del cadmio .....	53
2.2.3.4. El cadmio en la planta.....	54
2.2.4. Tecnologías de remediación de suelos contaminados con metales pesados.....	61
2.2.4.1. Clasificación de tecnologías de remediación .....	62
2.2.4.2. Tipos de tratamiento .....	64
2.2.4.3. Factores que inciden en los procesos de tratamiento.....	66
2.2.5. Fitorremediación.....	67
2.2.5.1. Fitoextracción de metales .....	70
2.2.5.2. Factores de bioacumulación y traslocación en la fitorremediación .....	70
2.2.6. Maíz ( <i>Zea mays L.</i> ).....	72
2.2.6.1. Fitorremediación del <i>Zea mays L.</i> .....	74
2.2.6.2. Influencia del cadmio en el crecimiento del maíz .....	77
2.2.7. Enmiendas orgánicas .....	77
2.2.7.1. Uso de enmiendas en la fitorremediación .....	78
2.2.8. Vermicompost.....	79
2.2.8.1. Características del vermicompost .....	82
2.2.9. Compost .....	86
2.3. Base Legal.....	89
2.4. Metodología .....	90

2.4.1. Protocolo de muestreo .....	90
2.4.1.1. Muestreo .....	90
2.4.2. Método teórico .....	94
2.5. Definición de términos básicos .....	94
<b>CAPÍTULO III .....</b>	<b>98</b>
<b>METODOLOGÍA .....</b>	<b>98</b>
3.1. Método y alcance de la investigación .....	98
3.1.1. Método general.....	98
3.1.2. Método específico .....	98
3.1.3. Tipo de investigación.....	99
3.1.4. Nivel de investigación.....	99
3.2. Diseño de la investigación .....	99
3.2.1. Diseño cuasiexperimental .....	99
3.3. Población y muestra .....	101
3.3.1. Población.....	101
3.4. Materiales y equipos .....	103
3.4.1. Materiales.....	103
3.5. Métodos .....	104
<b>CAPÍTULO IV.....</b>	<b>108</b>
<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>108</b>
4.1. Resultados del experimento y análisis de la información.....	108
4.1.1. Resultado del análisis de cadmio en el <i>Zea mays L.</i> .....	108
4.1.2. Resultado de análisis de cadmio en el suelo experimental .....	109
4.1.3. Resultado del factor de bioacumulación y traslocación en el <i>Zea</i> <i>mays L.</i> .....	110
4.1.3.1. Factor de bioconcentración en la parte foliar del <i>Zea mays L.</i> .....	110
4.1.3.2. Factor de bioconcentración en la parte radicular del <i>Zea mays</i> <i>L.</i> .....	112
4.1.3.3. Factor de traslocación.....	113
4.1.4. Resultado del análisis del suelo agrícola de Leonor Ordoñez.....	114
4.1.4.1. Características fisicoquímicas del suelo .....	114
4.1.4.2. Cadmio en el suelo .....	115
4.1.5. Resultado de análisis de cadmio en las enmiendas orgánicas .....	116

4.1.5.1. Concentración de cadmio en el vermicompost .....	116
4.1.5.2. Concentración de cadmio en el compost.....	117
4.2. Prueba de hipótesis .....	117
4.2.1. Enmiendas orgánicas en la concentración de cadmio en el maíz .	117
4.2.2. Enmiendas orgánicas en la concentración de cadmio en el suelo	120
4.2.3. Enmiendas orgánicas en el factor de bioacumulación y traslocación .....	122
4.3. Discusión de resultados .....	128
4.3.1. Enmiendas orgánicas y la concentración de cadmio en el <i>Zea mays</i> <i>L.</i> ....	128
4.3.2. Enmiendas orgánicas y la concentración de cadmio en el suelo ..	130
4.3.3. Enmiendas orgánicas y factor de bioacumulación.....	133
4.3.4. Enmiendas orgánicas y factor de traslocación .....	137
Conclusión.....	139
Recomendación .....	140
Lista de referencias .....	142
Anexo .....	167

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Capacidad de tierras en el Perú .....	17
Tabla 2. Operacionalización de variables.....	23
Tabla 3. Industrias generadoras de metales .....	38
Tabla 4. Ventajas y desventajas de las tecnologías de remediación (in situ) y (ex situ).....	63
Tabla 5. Ventajas y desventajas de las tecnologías de remediación .....	65
Tabla 6. Taxonomía del Zea mays L. ....	73
Tabla 7. Etapas del crecimiento del maíz (Zea mays L.).....	74
Tabla 8. Acumulación de los metales en la rizósfera del maíz .....	75
Tabla 9. Condiciones físicas mínimas del vermicompost .....	83
Tabla 10. Clasificación de los métodos de evaluación de la madurez del compost .....	88
Tabla 11. Estándar de calidad ambiental (ECA) para suelo .....	90
Tabla 12. Profundidad del muestreo según el uso del suelo.....	92
Tabla 13. Recipientes, temperatura de preservación y tiempo de conservación de muestras ambientales para los análisis correspondientes .....	93
Tabla 14. Número mínimo de puntos de muestreo para el muestreo de identificación.....	93
Tabla 15. Tratamientos en estudio .....	100
Tabla 16. Coordenadas UTM de los vértices de la parcela de muestra .....	102
Tabla 17. Coordenadas UTM de los puntos de muestreo .....	103
Tabla 18. Materiales de recolección de datos .....	103
Tabla 19. Resultado del análisis de cadmio total en el Zea mays L.....	108
Tabla 20. Resultado del análisis de cadmio total del suelo experimental.....	109
Tabla 21. Resultado del factor de bioacumulación en la parte foliar .....	111
Tabla 22. Resultado del factor de bioacumulación en la parte radicular .....	112
Tabla 23. Resultado del factor de traslocación.....	113
Tabla 24. Resultado de análisis fisicoquímicos del suelo experimental - Leonor Ordoñez, Jauja-2021 .....	114
Tabla 25. Resultado de análisis de cadmio total en el suelo agrícola-Leonor Ordoñez.....	115

Tabla 26. Estándares de calidad ambiental de suelos agrícolas.....	115
Tabla 27. Resultado de análisis de cadmio total en el vermicompost .....	116
Tabla 28. Resultado de análisis de cadmio total en el compost.....	117
Tabla 29. Prueba de normalidad de para tratamientos. Concentración de Cd en el Zea mays L.....	118
Tabla 30. Análisis de varianza para tratamientos. Concentración de Cd en el Zea mays L.....	118
Tabla 31. Prueba de comparación múltiple de Duncan para tratamientos. Concentración de Cd en el Zea mays L. ....	119
Tabla 32. Prueba de normalidad para tratamientos. Concentración de Cd en el suelo.....	120
Tabla 33. Análisis de varianza para tratamientos. Concentración de Cd en el suelo.....	121
Tabla 34. Prueba de comparación múltiple de Duncan para tratamientos. Concentración de Cd en el suelo.....	121
Tabla 35. Prueba de normalidad para tratamientos. Factor de bioconcentración en la parte aérea del Zea mays L. ....	122
Tabla 36. Prueba de Kruskall Wallis para tratamientos. Factor de bioconcentración en la parte aérea del Zea mays L. ....	123
Tabla 37. Prueba de normalidad para tratamientos. Factor de bioconcentración en la parte radicular del Zea mays L. ....	124
Tabla 38. Análisis de varianza para tratamientos. Factor de bioconcentración de Cd en la parte radicular del Zea mays L.....	124
Tabla 39. Prueba de comparación múltiple de Duncan para tratamientos. Factor de bioconcentración de Cd en la parte radicular del Zea mays L. .	125
Tabla 40. Prueba de normalidad para tratamientos. Factor de traslocación en el Zea mays L.....	126
Tabla 41. Análisis de varianza para tratamientos. Factor de traslocación de Cd en el Zea mays L.....	126
Tabla 42. Prueba de comparación múltiple de Duncan para tratamientos. Factor de traslocación de Cd en el Zea mays L. ....	127

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Dinámica de los metales pesados en el suelo .....	41
Figura 2. Disponibilidad de metales pesados de acuerdo al pH.....	45
Figura 3. Influencia de pH en la concentración de Cd en la solución suelo .....	52
Figura 4. Absorción y transporte del cadmio desde las raíces hacia las hojas por medio de vías apoplásticas (línea roja) y simplásticas (línea azul) ...	58
Figura 5. Mecanismo de regulación subyacentes al transporte del Cd en los tallos de la planta; absorción en las células del tallo; por vacuolas y carga de la xilema .....	59
Figura 6. Mecanismo de regulación subyacentes al transporte del Cd en las raíces de la planta; absorción en las células de la raíz; retención en las raíces por vacuolas y carga de la xilema.....	60
Figura 7. Mecanismo de regulación subyacentes al transporte del Cd en las hojas de la planta; absorción en las células de la hoja; retención en las hojas por vacuolas .....	60
Figura 8. Diseño completamente al azar del experimental de los 7 tratamientos en estudio.....	100
Figura 9. Mapa de Ubicación y Localización del lugar de muestreo.....	101
Figura 10. Puntos de la parcela de muestreo.....	102
Figura 11. Cultivo del maíz, a 45 días desde el sembrado.....	171
Figura 12. Muestras de suelo de cada unidad experimental, para su análisis de cadmio (Cd) en laboratorio .....	171
Figura 13. Muestras de raíz de cada unidad experimental, para análisis de cadmio (Cd) en laboratorio .....	172
Figura 14. Muestras de la parte foliar de cada unidad experimental, para su análisis de cadmio (Cd) en laboratorio .....	172

## RESUMEN

Con el objetivo de determinar el efecto de la aplicación de enmiendas orgánicas en la fitorremediación con *Zea mays L.* en un suelo contaminado con cadmio de Leonor Ordoñez, Jauja. 2021; el estudio se realizó con un diseño completamente al azar, en macetas de plástico con 7 tratamientos y 3 repeticiones, haciendo un total de 21 unidades experimentales; en cada maceta se colocó 2 kg de sustrato (suelo + % de enmienda orgánica), se utilizó 2 enmiendas orgánicas (vermicompost y compost) en 3 diferentes dosis (5%, 10% y 20%) más un testigo. Las semillas del maíz de variedad San Gerónimo fueron previamente germinadas durante 5 días y trasplantadas con 7 semillas por maceta, se dejó que las plantas se desarrollen por un período de 60 días; terminado el proceso experimental se analizaron las muestras de suelo, la parte foliar y radicular del *Zea mays L.* Los resultados mostraron que la aplicación de enmiendas orgánicas incrementó la concentración de cadmio total en el *Zea mays L.* en el rango de 6.94 mg/kg a 13.79 mg/kg, siendo los tratamientos con vermicompost a una dosis de 5%, 10% y 20% los que tuvieron los mejores resultados. La concentración de cadmio total en el suelo se incrementó en un rango de 7.38 mg/kg a 8.77 mg/kg con respecto al tratamiento control, siendo el tratamiento: control, compost a una dosis de 10% y 20%, vermicompost a una dosis de 20% los que tuvieron la menor concentración de cadmio en el suelo. El uso de enmiendas orgánicas incrementó el factor de bioconcentración (FBC) en la raíz del *Zea mays L.* de un rango de 0.59 a 1.23, siendo los tratamientos con vermicompost a una dosis de 5%, 10% y 20% los que tuvieron mejores resultados; también, el factor de traslocación (FT) incremento en un rango de 0.08 a 0.1 con respecto al tratamiento control, siendo los tratamientos con compost a una dosis de 05%, 10% y 20% los que tuvieron mejores resultados. En conclusión, la aplicación de enmiendas orgánicas no favorece la fitorremediación con *Zea mays L.* en un suelo contaminado con cadmio.

**Palabras clave:** cadmio, compost, fitorremediación, vermicompost, *Zea mays L.*

## ABSTRACT

The objective of determining the effect of the application of organic amendments in phytoremediation with *Zea mays* L. in a soil contaminated with cadmium in Leonor Ordoñez, Jauja, Peru, 2021. 2021; the study was conducted with a completely randomized design, in plastic pots with 7 treatments and 3 replicates, making a total of 21 experimental units; in each pot was placed 2 kg of substrate (soil + % of organic amendment), 2 organic amendments were used (vermicompost and compost) in 3 different doses (5%, 10% and 20%) plus a control. The San Geronimo variety maize seeds were previously germinated for 5 days and transplanted with 7 seeds per pot, the plants were left to develop for a period of 60 days; at the end of the experimental process, the soil, leaf and root samples of *Zea mays* L. were analysed. The results showed that the application of organic amendments increased the total cadmium concentration in *Zea mays* L. in the range of 6.94 mg/kg to 13.79 mg/kg, being the treatments with vermicompost at a dose of 5%, 10% and 20% the ones that had the best results. The concentration of total cadmium in the soil increased in the range of 7.38 mg/kg to 8.77 mg/kg with respect to the control treatment, being the treatment: control, compost at a dose of 10% and 20%, vermicompost at a dose of 20% the ones that had the lowest concentration of cadmium in the soil. The use of organic amendments increased the bioconcentration factor (BCF) in the root of *Zea mays* L. from a range of 0.59 to 1.23, being the treatments with vermicompost at a dose of 5%, 10% and 20% the ones that had better results; also, the translocation factor (TF) increased in a range of 0.08 to 0.1 with respect to the control treatment, being the treatments with compost at a dose of 05%, 10% and 20% the ones that had better results. In conclusion, the application of organic amendments does not favour phytoremediation with *Zea mays* L. in cadmium contaminated soil.

**Keywords:** cadmium, compost, phytoremediation, vermicompost, *Zea mays* L.

## INTRODUCCIÓN

Todo recurso natural ha sido indispensable para el desarrollo de la vida tanto para los humanos como los demás seres vivos; y uno de estos recursos es el suelo, que tiene una gran importancia en el ambiente, debido a sus características físicas, químicas y biológicas; por otra parte, ha servido para el progreso de las diferentes actividades que realiza el hombre, una de estas es la agricultura, que es una actividad esencial dentro de la alimentación y el desarrollo económico (1). Pero durante las últimas décadas se ha visto el surgimiento de las nuevas industrias y el incremento de las actividades mineras, las cuales han ido produciendo efectos adversos en el suelo, y una de la consecuencia de estos efectos es la contaminación de suelos con metales pesados.

La actividad minera dentro de la región Junín ha sido un problema constante para el ambiente, debido al contenido de altas concentraciones de metales pesados en sus aguas residuales, las cuales eran descargadas directamente al medio ambiente, llegando así a los ríos o cuerpos de agua, las cuales se encuentran dentro de su área de influencia, y ante ello hacían falta las normas y los entes fiscalizadores para este sector (2). Uno de los casos es del río Yauli, que ha sido afectado por la descarga de estas aguas residuales mineras durante muchos años, y que debido a las altas concentraciones de metales ocasionó la contaminación de este río, que a su vez contribuyó a la contaminación del río Mantaro, ya que es uno de sus afluentes; otra de las fuentes relacionadas a la contaminación de este río fueron las descargas de las aguas residuales domésticas que son procedentes de los centros poblados aledaños (3).

El valle del Mantaro es conocido como la despensa de productos para diversos departamentos de la zona centro del Perú, por ello la agricultura es la principal actividad que se desarrolla, la cual está sustentada por la irrigación con aguas del río Mantaro (4). Estas aguas muestran concentraciones de zinc, cobre, plomo, arsénico y cadmio, las cuales sobrepasan el estándar de calidad

ambiental del agua, y que al ser utilizado para el riego han generado la presencia de altas concentraciones de estos metales en los suelos agrícolas, tal como lo corroboran estudios realizados por diversas universidades de la región (5). Por otro lado, otro agente que ha contribuido el incremento de los metales en el suelo es el uso de plaguicidas en la agricultura, que contienen en su composición metales pesados.

El cadmio es un metal pesado y tóxico para los seres vivos, este se encuentra de manera natural en la corteza terrestre, debido a la presencia de rocas que contienen diferentes niveles de cadmio, pero el incremento de la presencia de este metal se debe a causas antropogénicas; este metal puede ser absorbido por la planta cuando se encuentra en la solución suelo en su mayoría  $Cd^{2+}$  (6).

Una manera eficaz de disminuir la concentración de cadmio en un suelo es mediante la aplicación de la fitorremediación, esta es una tecnología limpia y amigable con el ambiente, y es accesible en tema de costos; esta técnica consiste en el uso de plantas vivas que, valiéndose de los microorganismos asociados a su rizosfera, puede remediar *in situ* o *ex situ* los suelos contaminados, a través de procesos de remoción, degradación o estabilización de los contaminantes; pero la eficiencia de la fitorremediación va a depender del tipo de planta que se utilice en el proceso de descontaminación, y a su vez de las condiciones ambientales y las características fisicoquímicas del suelo contaminado (7). El maíz (*Zea mays L.*) es una de las plantas fitorremediadoras por su gran potencial de acumulación de cadmio en la parte radicular (8).

La utilización de enmiendas orgánicas en la fitorremediación de un suelo contaminado va a tener un efecto positivo, mejorando las características físicas y químicas del suelo, y de esta manera la planta puede tener un crecimiento óptimo y realizar el proceso de fitorremediación de forma efectiva; además las enmiendas orgánicas favorecen la disponibilidad de los contaminantes en forma de compuestos que la planta puede asimilarla de manera fácil (9).

El estudio tuvo como objetivo determinar el efecto de la aplicación de enmiendas orgánicas en la fitorremediación con *Zea mays L.* en un suelo contaminado con cadmio de Leonor Ordoñez, Juaja-2021; bajo la presunción que, la aplicación de enmiendas orgánicas favorece la fitorremediación con *Zea mays L.* en un suelo contaminado con cadmio.

La investigación está dividida en 5 capítulos, en las cuales se detalla todo lo realizado dentro de este trabajo. El capítulo I refleja el planteamiento y la formulación del problema; los objetivos; la justificación ambiental, social y económica; seguido de la descripción de las variables, y el planteamiento de las hipótesis.

En el capítulo II se presentan los antecedentes tanto nacionales e internacionales; se realizó la descripción del marco teórico, que sustenta la teoría en relación al tema, dentro de este marco se especifica la base teórica, la bases legales y definición de términos básicos.

En el capítulo III se expone la metodología, el método y el diseño de la investigación que sigue un diseño experimental completamente al azar con 7 tratamientos y 3 repeticiones.

En el capítulo IV se presentan los hallazgos más significativos.

Finalmente, se describen las conclusiones con respecto al objetivo y las hipótesis planteadas.

# **CAPÍTULO I**

## **PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO**

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

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

En todo el mundo, los suelos agrícolas han cumplido roles importantes para el desarrollo de la vida en la tierra, pero el incremento de las presiones humanas a lo largo de todos los continentes está generando que este recurso esté llegando a límites críticos, como la pérdida de la productividad, que a su vez ocasiona el incremento sutil del precio de los alimentos y a mayor escala causará que diversas familias que se dedican a la agricultura vivan en la pobreza (1). Las actividades antrópicas han incrementado con el tiempo, amenazando la estabilidad ecológica y la salud humana, una de estas actividades que mayor impacto ambiental ha tenido es la minería, la cual ha sido el responsable de la contaminación de recursos como el suelo, agua y aire por el inadecuado manejo de sus residuos, estos se caracterizan por poseer elevadas concentraciones de metales pesados (5).

Los metales y metaloides están presentes en todos los suelos agrícolas en concentraciones muy variables debido al material parental, y muchas veces son fundamentales para las plantas como componentes estructurales, pero la contaminación que genera el ser humano, ocasiona

el incremento y la acumulación de estos, convirtiéndolos en agentes contaminantes (10). En su mayoría estos metales no son biodegradables, por ello generan efectos tóxicos en los seres vivos, ya que se acumulan en órganos vitales (11). Entre los metales más abundantes y nocivos se encuentran: el cadmio (Cd), Zinc (Zn), mercurio (Hg), arsénico (As), cobre (Cu) y plomo (Pb).

El cadmio es un metal traza poco abundante en la corteza terrestre y que no está asociado a ninguna actividad biológica elemental, sin embargo sus características de bioacumulación, persistente y su facilidad con que es absorbido por las plantas lo convierten en un peligro latente para el medio ambiente y para la salud humana (12). En todos los suelos la movilidad del cadmio está ligada a factores, como son el pH, ya que en suelos ácidos la materia orgánica controla la solubilidad de este metal y en suelos alcalinos el cadmio no es móvil debido a que precipita, la fijación del cadmio está influenciado por la materia orgánica, la textura y el intercambio catiónico (13).

El Perú es reconocido como un país en crecimiento, dependiente de la producción de materia prima, donde los principales actores que realizan la actividad son pequeños y medianos agricultores que año tras año tienen que luchar con problemas de contaminación del suelo (14). El suelo con fines agrícolas en el Perú es el recurso más escaso, se estima que solo 7.6 millones de hectáreas del territorio nacional tienen el potencial y capacidad para cultivos agrícolas (15).

**Tabla 1. Capacidad de tierras en el Perú**

Capacidad de la tierra	Terreno (millones de ha)	Porcentaje (%)
<b>Terreno total</b>	<b>128.5</b>	<b>100</b>
Actividad agrícola	7.6	6
Pastos	17.0	13
Forestal	48.7	38
Protección	55.2	43

*Nota:* tomada de Reducción de la degradación de suelos agrarios (15)

Dentro del Perú existen casos en los que la actividad minera ha tenido un impacto ambiental crónico como la liberación de residuos químicos, drenajes ácidos y relaves, afectando a los ecosistemas, entre ellos se puede nombrar el caso de la contaminación del río Mantaro que en toda su trayectoria tiene afluentes, donde muchos de ellos tenían antecedentes de contaminación por residuos mineros (16). La parte central de la cuenca del río Mantaro es una de las áreas más afectadas, debido a dos causas principalmente, la primera es el río Yauli que es un afluente del río Mantaro, este río por muchos años ha sido receptor de efluentes sin tratar o parcialmente tratados de las operaciones mineras y metalúrgicas de: San Cristóbal, concentradora de Mahr Túnel; Carahuacra; Morococha; Austria Duvaz; Manuelita (Yauli); Anticona (Santa Rita) y Calera Cut-off; la segunda viene de una descarga directa de relaves mineros al río Mantaro de la fundición y refinería de La Oroya (3).

El valle del Mantaro es pionero en la agricultura en el centro del país, se caracteriza por la existencia de dos márgenes (izquierda y derecha), en las cuales se producen variedades de productos como (hortalizas, leguminosas, granos, tubérculos, etc.), estos sembríos usan como fuente de irrigación las aguas provenientes del río Mantaro, que contienen elevadas concentraciones de metales pesados como es el caso del cadmio; además el uso de plaguicidas también influyen en la presencia de este metal ya que los plaguicidas en su composición contienen metales como el cadmio (4). Estas causas han incrementado los niveles de cadmio hasta sobrepasar los estándares de calidad ambiental (ECA) provocando un impacto negativo en las características del suelo, así como la disminución del crecimiento de microorganismos del suelo y el rendimiento de los cultivos (5). Con la presencia de este metal en el suelo agrícola se garantiza la afectación de los cultivos y la salud humana mediante la cadena trófica (5).

La recuperación de un suelo contaminado es restaurar sus propiedades biológicas, químicas y físicas, para lo cual hay diferentes

técnicas y metodologías. La fitorremediación es una técnica utilizada para remediar suelos contaminados con metales pesados, donde se aprovecha la capacidad de diversas especies de plantas para metabolizar, absorber, acumular, estabilizar o volatilizar los contaminantes presentes en el cuerpo receptor (17). Esta técnica posee ventajas frente a los demás tratamientos, como el bajo costo, una tecnología sustentable que puede realizarse *in situ* o *ex situ* y es muy eficiente para contaminantes orgánicos e inorgánicos, pero las plantas fitorremediadoras pueden verse perjudicadas por las altas concentraciones tóxicas de los contaminantes, por ende es eficaz en ambientes con concentraciones menores (18).

Las enmiendas cumplen una función principal en la reducción de la biodisponibilidad de los contaminantes en el suelo, además mejoran la fertilidad del suelo, incremento del pH, el aumento de la materia orgánica y las actividades biológicas, las cuales ayudan al desarrollo de la planta fitorremediadora (19).

El *Zea mays L.* es conocida como una planta fitorremediadora para suelos contaminados con cadmio, según estudios realizados esta especie absorbe metales pesados del suelo, con mayor acumulación de cadmio en la raíces y hojas, afirmando que contribuye a la solubilización de metales en el suelo (20).

## **1.1.2 Formulación del problema**

### **1.1.2.1 Problema general**

¿Cuál es el efecto de la aplicación de enmiendas orgánicas en la fitorremediación con *Zea mays L.* en un suelo contaminado con cadmio de Leonor Ordoñez, Jauja 2021?

### **1.1.2.2 Problemas específicos**

¿Cuál es el efecto del compost y el vermicompost en la concentración de cadmio total en *Zea mays L.*?

¿Cuál es el efecto del compost y el vermicompost en la concentración de cadmio total en el suelo?

¿Cuál es el efecto del compost y el vermicompost en el factor de bioacumulación y de traslocación de cadmio para *Zea mays L.*?

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo general**

Determinar el efecto de la aplicación de enmiendas orgánicas en la fitorremediación con *Zea mays L.* en un suelo contaminado con cadmio de Leonor Ordoñez, Jauja 2021.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

- Determinar el efecto del compost y el vermicompost en la concentración de cadmio total en *Zea mays L.*
- Determinar el efecto del compost y el vermicompost en la concentración de cadmio total en el suelo.
- Evaluar el efecto del compost y el vermicompost en el factor de bioacumulación y de traslocación de cadmio para *Zea mays L.*

## **1.3 Justificación e importancia**

### **1.3.1 Ambiental**

La investigación busca disminuir los impactos generados en los suelos agrícolas dentro de la jurisdicción del distrito de Leonor Ordoñez, debido a que estos suelos presentan concentraciones altas de cadmio, perjudicando a la fertilidad y modifican las propiedades químicas y biológicas del suelo. Por ende, los resultados de la investigación aportarán en la identificación de una alternativa de remediación del suelo como es la fitorremediación con *Zea mays L.*, con la aplicación de enmiendas orgánicas que permitirá recuperar la salud del suelo para que este recurso tenga la capacidad de realizar sus funciones de forma sostenible y respetando los procesos ecológicos que se desarrollan dentro del suelo.

### **1.3.2 Social**

Los resultados obtenidos en este trabajo de investigación serán base para poder realizar cualquier remediación que emplea enmiendas orgánicas para la recuperación de suelos agrícolas contaminados con metales pesados, donde se verán beneficiados los agricultores del distrito de Leonor Ordoñez, y la población del valle del Mantaro que en su mayoría tienen como fuente de ingresos a la agricultura. Además, estos resultados serán útiles para las entidades públicas y privadas como información confiable y efectiva, para que a futuro puedan realizar proyectos de remediación que beneficien a la población y el medio ambiente, generando así, un desarrollo sostenible.

### **1.3.3 Económico**

La reducción de la concentración de cadmio en el suelo del distrito de Leonor Ordoñez mediante la fitorremediación con *Zea mays L.* con la aplicación de enmiendas orgánicas (compost y vermicompost), es una alternativa accesible a la población y de bajo costo, donde los agricultores podrán emplearlo de manera sencilla y sin que afecte su capital agrícola. Por otro lado, esta técnica de remediación beneficiará el ingreso económico del agricultor con el incremento de la producción y la obtención de cosechas de buena calidad.

## **1.4 Hipótesis y descripción de variables**

### **1.4.1 Hipótesis general**

La aplicación de enmiendas orgánicas favorece la fitorremediación con *Zea mays L.* en un suelo contaminado con cadmio de Leonor Ordoñez, Jauja 2021.

### **1.4.2 Hipótesis específicas**

- El compost y el vermicompost influyen significativamente en la concentración de cadmio total en *Zea mays L.*
- El compost y el vermicompost influyen significativamente en la concentración de cadmio total en el suelo.

- El compost y el vermicompost influyen en el factor de bioacumulación y de traslocación de cadmio para *Zea mays L.*

### **1.4.3 Operacionalización de variables**

#### **1.4.3.1 Variable dependiente**

Fitorremediación con *Zea mays L.*

#### **1.4.3.2 Variable independiente**

Enmiendas orgánicas (vermicompost y compost)

**Tabla 2. Operacionalización de variables**

<b>Variables</b>	<b>Tipo de variables</b>	<b>Definición conceptual</b>	<b>Dimensiones</b>	<b>Indicador</b>	<b>Unidad</b>
Variable dependiente: Fitorremediación con <i>Zea mays L.</i>	Naturaleza: Cuantitativa	Tecnología sustentable basada en el uso de plantas para reducir ex situ e in situ la concentración de contaminantes inorgánicos e orgánicos de suelos, agua y aire a partir de procesos bioquímicos (21).	Concentración de cadmio en el suelo.	Cadmio	mg/kg
	Complejidad: Compleja		Concentración de cadmio en parte radicular de la planta.	Cadmio	mg/kg
	Función: Dependiente		Concentración de cadmio en la parte foliar de la planta.	Cadmio	mg/kg
Variable independiente: Enmiendas orgánicas	Naturaleza: Cuantitativa	Materiales carbonados de origen animal o vegetal cuya principal función es la de aportar nutrientes a la planta y para mantener o aumentar el contenido de materia orgánica del suelo, mejorar sus propiedades químicas y biológicas (22).	Aplicación por niveles porcentuales de compost al suelo (relación masa: masa)	Porcentaje por kilogramo de suelo	g
	Complejidad: Compleja		Aplicación por niveles porcentuales de vermicompost al suelo (relación masa: masa)	Porcentaje por kilogramo de suelo	
	Función: Independiente				

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1. Antecedentes del problema

##### 2.1.1. Antecedentes internacionales

El artículo “*Fitorremediación de residuos de minas contaminados con metales pesados*”, realizado en el distrito minero de la ciudad de Pachuca-Real del Monte con los jales mineros de la mina Dos Carlos, tuvo como objetivo evaluar la capacidad fitorremediadora de *Lolium perenne* y *Poa pratensis* en los jales mineros con la adición de enmienda (composta). La experimentación se desarrolló con la siembra de especies vegetales con presencia y ausencia de composta, lo que resultó en 6 tratamientos por especie con 2 repeticiones cada uno. La adición de enmienda orgánica se realizó con una dosis de 80 t/ha en los primeros 10 cm de jale. La siembra de *Lolium perenne* fue con una densidad de 357 kg/ha y *Poa pratensis* con una densidad de 328.5 kg/ha. La experimentación fue realizada en temporada de lluvias. La *Lolium perenne* estuvo establecida por 103 días y la *Poa pratensis* por 80 días. Se concluyó que la adición de enmienda orgánica (composta) en los jales mineros favoreció el crecimiento, la germinación y desarrollo de la planta, como también la mayor producción de biomasa. La extracción de los metales pesados con *Lolium perenne* (cadmio >manganeso >plomo >zinc >níquel >cobre) y *Poa pratensis* (níquel>manganeso>cadmio>zinc>plomo>cobre) varió

según los tratamientos y el metal pesado, y se acumuló mayormente en las raíces de las plantas. Finalmente se recomienda la utilización de composta y la especie *Lolium perenne* (buen desarrollo y su virtud en extracción de metales pesados) en saneamiento de jales de mina (23).

El artículo científico "*Metales pesados en maíz (Zea mays L.) cultivado en un suelo enmendado con diferentes dosis de compost de lodo residual*", con el objetivo de estudiar la absorción y la distribución de metales pesados (Cu, Zn, Ni, Cd, Pb y Cr) en plantas de maíz (*Zea mays L.*) cultivadas en un tipo de suelo calcáreo que fue enmendando mediante diferente dosis de compost de lodo residual. El diseño experimental estuvo dado por una parcela que fue dividida en cuatro partes iguales, estas partes representan un bloque y cada bloque fue dividido en 6 subparcelas (100 m<sup>2</sup>) a las que se les aplicaron los siguientes tratamientos: T1 (Testigo), T2 (30 mg/ha de compost en sementera), T3 (15 mg/ha de compost en sementera y misma cantidad en cobertera), T4 (60 mg/ha de compost en cementera), T5 (30 mg/ha de compost en sementera y 100 kg/ha de nitrato amónico cálcico 27% N en cobertura). Se tomaron muestras del suelo a diferentes profundidades (0 a 20 cm, 20 a 40 cm, 40 a 60 cm, 60 a 80 cm), se extrajeron 4 muestras que estuvieron compuestas por 12 submuestras, por parcela. Los resultados obtenidos fueron que las concentraciones de metales asimilables a lo largo del perfil no presentan diferencia significativa entre los tratamientos incluido el testigo. La producción de materia seca en las distintas plantas de maíz no presentó diferencias significativas y los granos encontrados están dentro de los rangos normales para esta variedad. Referente a los metales pesados, el Ni y Cd hallados en tallos y raíz tienen valores lejos de lo considerados críticos, en el caso del Pb y Cr fueron retenidos en la raíz de la planta y no pasaron a la parte aérea (24).

El artículo científico "*Solubilidad de metales pesados/metaloides en muestras de suelo contaminado con múltiples metales de un área de procesamiento de mineral de oro: efectos de sustancias húmicas*", tuvo como objetivo el estudio del pH del suelo y el resultado de la solubilidad

de los metales pesados por niveles de HA (ácido húmico) y FA (ácido fúlvico) aplicados a muestras de suelos, que se encuentran con diferentes niveles de contaminación. El ácido fúlvico y ácido húmico se obtuvieron en forma de material líquido que se encuentra comercialmente disponible, extraído de Leonardita. El diseño del experimento tuvo como esquema factorial de 4 x (4 +1), que cuenta con 4 muestras de suelo contaminado y con 4 tratamientos, compuesto por 2 niveles de ácido húmico, 2 niveles de ácido fúlvico y un control. La experimentación tuvo como resultado que los tratamientos con ácido húmico aumentaron la solubilidad de Cr, Cu, Zn, Pb, Ni, Cd, Ba y As en los suelos, los tratamientos con ácido fúlvico redujeron la movilidad y disponibilidad de los metales. La concentración de HA no influyó en el pH del suelo, mientras que el FA sí influyó, disminuyendo el pH hasta 0,7 unidades. Los resultados obtenidos dan a conocer el uso del ácido húmico para incrementar la disponibilidad de metales pesados en plantas favoreciendo a proyectos de remediación y el uso de ácido fúlvico para reducir la disponibilidad de metales pesados en plantas, este puede ser utilizado en lugares contaminados con un alto riesgo de introducción de metales hacia la cadena alimenticia (25).

El artículo científico "*Efectos del ácido húmico sobre la absorción de metales pesados por plantas herbáceas en suelos contaminados simultáneamente por hidrocarburos de petróleo*" tuvo como objetivo investigar los efectos del ácido húmico sobre la disponibilidad de metales pesados en el suelo y en 3 especies de plantas herbáceas en un suelo contaminado con metales pesados e hidrocarburos de petróleo, para ello se realizó la aplicación de un estudio experimental. Los resultados revelaron que el ácido húmico disminuyó las formas solubles e intercambiables de los metales en el suelo y a la misma vez incrementó formas fitodisponibles para las plantas. Por otro lado, el ácido húmico también incrementó la acumulación de Cd, Pb, Ni y Cu en las raíces y brotes de las plantas herbáceas. También el HA incrementó el factor de bioconcentración (BCF) de *Festuca arundinacea* en brotes de 0,30 a 1,10 y el BCF de *Brassica campestris* en raíces para Pb y Ni. Los resultados demuestran que la enmienda de ácido húmico (HA) aumenta la absorción

de metales pesados por la planta y a su vez disminuye la lixiviación de metales pesados (previene contaminación del subsuelo) (26).

El artículo “*Potencial fitorremediador de la chicura (Ambrosia ambrosioides) en suelos contaminados por metales pesados*”. El trabajo de investigación tuvo como objetivo evaluar el potencial fitorremediador de *Ambrosia ambrosioides* en un suelo contaminado y determinar absorción del plomo, cadmio y cobre en la planta chicura con diferentes concentraciones (0, 20,40 y 60 mg/l), aplicada mediante el agua de riego. El análisis se determinó por absorción atómica y con ello se calculó el factor de bioconcentración y traslocación. El experimento y análisis se trabajaron en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro Unidad Laguna. El diseño realizado fue con factorial de 3 x 4 con 4 repeticiones, donde el factor A es metal pesado y el factor B la concentración del metal pesado, se tuvo 12 tratamientos. Como resultados se tuvo que en la raíz, tallo y hojas las más altas concentraciones se observaron en el tratamiento de cobre con 20 mg/l con 15 827.2, 13 030.9 y 4 979.4 mg/kg. En general el Cu fue el metal que más fue absorbido por la planta seguida del Cd y Pb. El cadmio es el metal pesado que la planta transloca a las hojas con más facilidad según el factor de traslocación. En *Ambrosia ambrosioides* no hay traslocación del elemento Cd. En todos los tratamientos el factor de bioacumulación superó el valor de 1, esto muestra que se realizó una alta fitoextracción. Finalmente, la *Ambrosia ambrosioides* es efectiva en la fitorremediación y puede ser utilizada en la sanidad de suelos contaminados con metales pesados (27).

La tesis doctoral “*Remediación de suelos forrajeros contaminados con metales pesados. Impacto de la aplicación de residuos orgánicos y fitoextracción*”, el objetivo de la investigación fue evaluar el efecto de la aplicación de residuo orgánico (compost) en la eficiencia de la fitorremediación y también evaluar el efecto de la fitorremediación con uso de compost de biosólidos en el desplazamiento de los metales Pb, Cu, Cd y Zn a lo largo de los horizontes del suelo contaminado. Para la experimentación se muestrearon los horizontes (A, Bt y Bc) de suelos del

partido de San Antonio Areco, provincia de Buenos Aires, estos suelos fueron adicionados con soluciones de nitratos de Cd (149,2 mg/kg), Pb (149,2 mg/kg), Zn (166,4 mg/kg) y Cu (mg/kg). El suelo fue puesto en columnas de PVC de 0,15 m de diámetro para observar la lixiviación. Se realizaron 4 tratamientos: T1 (suelo contaminado-testigo), T2 (suelo contaminado + planta), T3 (suelo contaminado + 50 t/ha compost) y T4 (suelo contaminado + 50 t/ha compost + planta). La especie utilizada fue *Festuca rubra* y el compost estaba compuesto por aserrín y biosólidos (1:1, v:v) obtenido de una planta de tratamientos de aguas cloacales. El diseño experimental estuvo dado por bloques completamente al azar con 3 repeticiones por tratamiento. Los resultados que se obtuvieron fue que la aplicación del compost generó un impacto positivo, ya que aumentó la biomasa de la planta y esta a su vez redujo el efecto de erosión y disminuyendo la lixiviación de los metales hacia otros horizontes del suelo. También con la aplicación de compost incrementó la relación de Cadmio y Plomo aéreo/raíz, de esta manera permitió incrementar y potenciar el efecto fitorremediador de *Festuca rubra*, debido a la posibilidad de poder cosechar una mayor proporción de metal absorbido por la planta (28).

La tesis doctoral "*Fitorremediación de suelos contaminados con metales pesados. Evaluación de especies nativas en la provincia de Córdoba*", tuvo como objetivo estudiar el efecto de fertilizantes en el comportamiento de la raíz de especies *Tagetes minuta* y *Bidens pilosa* y una especie *Brassica juncea* que posee referencia como fitoextractora de Pb. La experimentación tiene un diseño bifactorial, donde se estudió el efecto de los microorganismos promotores de crecimiento vegetal en el crecimiento longitudinal de las raíces de las especies nativas, la generación de biomasa subterránea y aérea y las tasas de extracción del Pb cuando las especies crecen en suelos con diferentes niveles de plomo. Para cumplir con la experimentación se implementaron rizocajas donde se colocaron una especie por caja, donde el suelo estaba en condiciones de homogeneidad. Como resultado se obtuvo que la acumulación de Pb representada como la extracción por especies nativa en la *B. pilosa* fue superior (el doble) a las otras 2 especies nativas. También los resultados

exponen que ninguna de las 3 especies nativas expresó preferencia por suelos con baja o alta concentración de plomo, porque la raíces crecieron igual en todas las direcciones. El microorganismo *Azospirillum brasilense* induce el crecimiento de raíces de especies *B. juncea* y *B. pilosa* con tropismo positivo hacia el plomo. Finalmente, se puede recalcar que el uso de biofertilizantes en el proceso de fitoextracción (*Tagetes minuta*) de plomo puede incrementar la extracción total si se utilizan microorganismos como *Pseudomonas fluorescens* y *Azospirillum brasilense* (29).

### **2.1.2. Antecedentes nacionales**

En el trabajo de investigación “*Absorción de plomo y cadmio por girasol de un suelo contaminado y remediado con enmiendas orgánicas en forma de compost y vermicompost*”, donde se tuvo como objetivo evaluar el efecto de las enmiendas orgánicas (compost y vermicompost) y el girasol como planta fitorremediadora. Los tratamientos fueron: control (T1), compost 2% (T2), vermicompost 2% (T3) para ambos suelos (Muqui y Mantaro), haciendo un total de 6 tratamientos. El girasol fue sembrado a 1,2 cm por debajo del nivel del suelo y se le aplicó riego necesario hasta alcanzar su madurez fisiológica. Los resultados finales indican que el girasol como planta fitorremediadora absorbe los metales en la raíz, y que hay diferencias significativas en las demás partes de la planta (tallos, hojas y flores), y se confirma que la aplicación de enmiendas orgánicas contribuye a solubilizar el Pb y Cd, además ayuda a desarrollar el cultivo. En los valores del factor de bioconcentración el cadmio fue mejor que el plomo, mientras que en el factor de traslocación muestran al girasol como un fitoestabilizador, en especial con el uso de vermicompost (4).

En el trabajo de investigación “*Fitorremediación con maíz (Zea mays L.) y compost de Stevia en suelos degradados por contaminación con metales pesados*”, donde se tuvo como objetivo observar el efecto de las enmiendas orgánicas (compost y vermicompost de Stevia) en la fitorremediación con maíz (*Zea mays*). Se empleó un diseño experimental completamente al azar (DCA) con 3 tratamientos (T1: compost de Stevia, T2: vermicompost de Stevia y T3: químico) con 3 repeticiones por cada

lugar (Muqui y Mantaro), Los resultados muestran que los suelos de Muqui contienen mayor cantidad de metales pesados (Pb y Cd), perjudicando el desarrollo de las hojas, tallos y raíces del maíz. El maíz como planta fitorremediadora absorbe los metales como plomo y cadmio en la parte de la raíz, ratificando que la aplicación de enmiendas orgánicas ayudan a solubilizar el Pb y Cd del suelo, pero en este caso el vermicompost fue el más efectivo absorbiendo los metales pesados del suelo; los factores de bioconcentración y de traslocación afirman que el maíz es exclusora o estabilizadora (5).

El trabajo de investigación "*Fitorremediación de suelos contaminados por metales (plomo y cadmio) mediante planta nativa maíz (Zea mays L) en la minería*", donde se tuvo como objetivo presentar una revisión de la literatura sobre la capacidad fitorremediadora de la planta nativa *Zea mays L.* para suelos contaminados por Pb y Cd en la minería, las modalidades de tratamiento fue analizar qué tan efectiva es la planta de maíz para remover plomo y cadmio en suelos contaminados de la minería. Los mejores resultados fueron analizar la fitorremediación en maceteros que la planta haya alcanzado su crecimiento total. En conclusión, la planta del maíz (*Zea mays L.*) resultó eficiente para la fitorremediación de suelos contaminados por Pb y Cd, por lo que esta técnica resulta ser una alternativa sostenible, con lo que ayuda a disminuir el problema de la contaminación de los suelos ocasionados por la actividad minera (20).

En el trabajo de tesis "*Remoción de cadmio y plomo en suelos a orillas del río Mantaro, Junín, mediante fitorremediación con girasoles (Helianthus annuus) y maíz (Zea mays) usando enmiendas*", donde se tuvo como objetivo determinar la cantidad de cadmio y plomo removido en suelos contaminados, aplicando *Zea mays* (maíz) y *Helianthus annuus* (girasol) con distintas enmiendas orgánicas, mediante la técnica de fitorremediación, Jauja, Junín. El experimento se desarrolló teniendo 6 tratamientos más 2 testigos (sin enmiendas) con 3 repeticiones, dando un total de 24 pruebas. En un tiempo de 64 días los resultados obtenidos con

un nivel de confianza al 95% determina la remoción de metales en el suelo, con un 11% de remoción de cadmio y un 9.951% de plomo con las respectivas plantas empleadas, siendo la mayor concentración de los metales en la biomasa radicular, y teniendo mejores resultados con el maíz usando compost más humus. En conclusión, el estudio demuestra que la mejor especie para remover metales fue, *Zea mays* con 76.22 mg/kg de plomo removido en su biomasa radicular y un valor de 2.18 mg/kg de cadmio removido en su biomasa radicular, a diferencia del girasol que fue 14.72 mg/kg de plomo en su biomasa radicular y 1.83 mg/kg de cadmio en su biomasa radicular (30).

En el trabajo de tesis “*Efecto de la aplicación de estiércol de lombriz en la disponibilidad de arsénico y cromo, en un cultivo de maíz del distrito de Orcotuna, Concepcion-2016*”, donde se tuvo como objetivo determinar el efecto de aplicación de diferentes dosis de estiércol de lombriz en la disponibilidad de arsénico y cromo en el maíz cultivado en suelos agrícolas del distrito de Orcotuna. El estudio se realizó con un diseño completamente al azar; en bolsas de plástico, repartidos en 3 bloques, con 5 tratamientos, haciendo 15 unidades experimentales; los porcentajes de estiércol fue de 5%, 10% y 20% más el testigo, todo en un período de 62 días de desarrollo de la planta. Los resultados muestran que la aplicación de estiércol de lombriz reduce la disponibilidad de cromo total en el rango de 1.81 a 11.60 mg/kg en la parte aérea de la planta del maíz y aumenta la disponibilidad de arsénico en el rango de 0.53 a 3.66 mg/kg en la parte aérea tras el empleo de 5%, 10%, 15% y 20% de la enmienda, siendo el 15% la dosis más efectiva (31).

El trabajo de tesis “*Fitoextracción de metales pesados en suelo contaminado con Zea mays L. en la estación experimental el Mantaro-Junín*”, donde se tuvo como objetivo aplicar la tecnología de la fitoextracción en los suelos contaminados por metales pesados utilizando *Zea mays L.* en la estación experimental el Mantaro en el año 2016. Se trabajó con muestras de tres lotes de terreno (A, B, C), en una extensión de 125 m<sup>2</sup>. El maíz utilizado fue de la variedad cuzqueado, y fueron

sembrados a 20 cm de profundidad, llegando la etapa de madurez se realizaron cortes de tallos, hojas, raíces y semillas para analizar la presencia de metales pesados. Los resultados mostraron que la fitoextracción fue efectiva, el tratamiento de estos resultados se realizó utilizando un diseño experimental de bloques completamente randomizados (DBCR). Por lo tanto, se declara al maíz como planta excluyente de metales pesados con la excepción de sus semillas, por tener un factor de bioconcentración menor que uno (32).

El trabajo de tesis *“Recuperación de suelos degradados por contaminación con metales pesados en el valle del Mantaro mediante compost de Stevia y fitorremediación”*, donde se tuvo como objetivo estudiar el efecto de la aplicación de compost y vermicompost a base de Stevia sobre la extracción de los metales pesados y la fertilidad de los suelos agrícolas del valle del Mantaro con la aplicación de la técnica de fitorremediación, con uso de plantas fitorremediadoras. El trabajo se realizó bajo condiciones de laboratorio, con la finalidad de observar la eficiencia de las enmiendas, empleando maíz y girasol como plantas fitorremediadoras, además se emplearon dos tipos de suelos (Mantaro y Muqui), las cuales contienen plomo y cadmio superando al ECA de suelos del Perú. Los resultados muestran que Muqui tiene el más alto contenido de Pb y Cd presentando efectos negativos en la planta, las enmiendas empleadas contribuyeron a la solubilización del Pb y Cd para una mejor absorción de las plantas, por lo que el maíz acumuló plomo promedio en las raíces (80%), hojas (15%) y tallos (5%), en el caso de cadmio acumuló en las raíces (91%), hojas (6%) y tallos (3%). El girasol acumuló plomo en las raíces (55%), hojas (42%), flores (5%) y tallos (3%), en caso del cadmio en las raíces (40%), hojas (32%), flores (8%) y tallos (20%), por lo que estos cultivos extraen mayor Pb cuando el suelo presenta mayor contenido, y extraen mayor cadmio cuando el suelo presenta menor contenido; se encontró que la aplicación del vermicompost de Stevia fue el más efectivo para la absorción de nutrientes, sin lograr que afecten a las plantas los altos contenidos de plomo y cadmio, los cálculos del factor

de bioconcentración y el factor de traslocación, indican que el maíz y el girasol son plantas excluidoras o estabilizadoras (33).

El trabajo de tesis "*Efecto de la cal, materia orgánica y EM en el contenido de cadmio en un suelo contaminado en el centro poblado de Huancaní, distrito de Leonor Ordoñez, provincia de Jaén-2019*", donde se tuvo como objetivo determinar el efecto de la cal, materia orgánica y EM en el contenido de cadmio de un suelo contaminado. Se utilizó  $\text{CaCO}_3$  como fuente de cal en niveles de 0 y 1 g/kg; estiércol de lombriz como fuente de materia orgánica en niveles de 0 y 20%; y microorganismos eficaces inoculados al suelo en niveles de 0 y 20%. Los tratamientos están bajo el diseño experimental completamente al azar con arreglo factorial 2 x 2 x 2 con tres repeticiones, estos fueron incubados, en condiciones de 25 °C en una estufa, por un período de 2 meses, dentro de un vaso de precipitación con 200 g de tierra fina secado al aire (TFSA). Los niveles de 1 g  $\text{CaCO}_3$ /kg suelo y 20% estiércol de lombriz, disminuyeron significativamente la concentración de Cd en el suelo, esto representando el 8.37% y 10.96% del contenido de Cd en suelos sin enmienda. Las interacciones Cal x estiércol de lombriz, Cal x microorganismos eficaces, estiércol de lombriz x microorganismos eficaces y Cal x estiércol de lombriz x microorganismos eficaces, también disminuyeron significativamente la concentración de Cd en el suelo (34).

## **2.2. Bases teóricas**

### **2.2.1. Contaminación del suelo**

En términos generales la contaminación del suelo está referida a la presencia de una sustancia química que fue incorporada fuera del sitio o está presente en concentraciones más altas de lo normal, que va a generar efectos negativos a cualquier organismo al que no estaba destinado (35). Las causas de los problemas de contaminación del suelo son diversas, las cuales son difíciles de controlar y están fuera de una clasificación sistemática, entre las causas de estas características están los derrames accidentales de sustancia peligrosas y las descargas ilegales, efectuados por empresas clandestinas o ilegales (36).

Los efectos negativos que previene de la contaminación del suelo se muestran por diferentes vías, que provocan el acceso de contaminantes a la población y componentes del medio ambiente que se encuentran colindantes. Estos efectos se materializan mediante el contacto directo con un suelo contaminado, también los contaminantes son transportados por el aire (previa evaporación del contaminante) y corrientes de agua hacia el suelo (37).

#### **2.2.1.1. Principales contaminantes del suelo**

La emisión o descarga de contaminantes al medio ambiente, principalmente, se genera por los procesos antropogénicos, por lo que las intervenciones humanas son los que aportan un mayor grado de contaminación al suelo, pero también algunos elementos y compuestos contaminantes pueden encontrarse de forma natural en el suelo.

##### **a) Metales pesados y metaloides**

Los metales pesados y metaloides son un grupo de elementos que presentan características metálicas únicas, dentro de este grupo se incluye los metales de transición, algunos semimetales, lantánidos y actínidos. De manera general, la característica principal de un metal está dada por su densidad específica, donde todos los elementos que pertenecen a los metales y metaloides tienen una densidad mayor a  $5 \text{ g/cm}^3$  (38). Entre los metales que presentan problemas de toxicidad se encuentran Pb, Cd, Cu, Hg, Sn y Zn, estos elementos pueden generarse de manera natural en bajas concentraciones en los suelos, pero la actividad humana incrementa su concentración convirtiéndolos en contaminantes. Muchos de estos elementos son micronutrientes utilizados por las plantas, animales y humanos, pero en concentraciones altas provocan fitotoxicidad y afectan la salud humana, debido a que son de una naturaleza no biodegradable, acumulándose de manera rápida y fácil en los tejidos y organismo vivos (39).

Los metales pesados no pueden ser destruidos o degradados fácilmente de manera biológica o natural, debido a que no presentan una determinada función metabólica en los seres vivos. Estos elementos son altamente peligrosos en el suelo porque pueden bioacumularse fácilmente en los diferentes cultivos, esta bioacumulación representa un incremento de acumulación de algún elemento químico en un organismo vivo en un determinado tiempo, comparada a la concentración del mismo elemento químico en el medio ambiente (40).

Los metales Cd y Pb no son esenciales para la nutrición de plantas, porque perjudica el desarrollo vegetal y es tóxico también para animales y el ser humano. La fitotoxicidad ocasionada por estos elementos, cuando se encuentran en elevadas concentraciones, perjudica la fisiología de plantas, debido a que se acumulan en tejidos vegetales. Hay diversos problemas que los metales pesados ocasionan a las plantas como el incremento de permeabilidad de las raíces, haciendo que sean menos selectivas en la absorción y permeabilidad de elementos en la solución suelo; perturbación en la relación planta-agua; perturbación en los sistemas enzimáticos de las especies vegetales e inhiben en el proceso de fotosíntesis y respiración celular (41).

La contaminación por metales pesados se ha incrementado a lo largo del paso de los años debido al crecimiento de la población y actividades antropogénicas realizadas para satisfacer necesidades u obtener algún beneficio económico. Entre las principales fuentes de contaminación se tiene a la minería, la metalúrgica, la actividad agrícola y los vehículos motorizados (38).

#### **b) Nitrógeno y fósforo**

El nitrógeno es un nutriente primario, ya que es un constituyente de enzimas, proteínas, ADN y clorofila. Este elemento se presenta en formas orgánicas como inorgánicas y en

diversos estados de oxidación. Las formas disponibles dependen del organismo específico que lo va a requerir. La forma no reactiva del nitrógeno como es el  $N_2$  (nitrógeno gaseoso), son asimiladas mediante la actividad microbiana, dando resultado al amonio ( $NH_4^+$ ) y el nitrato ( $NO_3^-$ ) que son compuestos disponibles que las plantas pueden absorber (42).

Este elemento muchas veces es la principal limitante para una adecuada productividad agrícola, por ende, los agricultores utilizan fertilizantes para poder incrementar las concentraciones de este elemento en el suelo. Pero la acción humana ha producido la entrada de altas cantidades de nitrógeno antropogénico al suelo, creando unos impactos ambientales y en el ciclo global del nitrógeno (43).

El fósforo es un esencial micronutriente para organismo vivos, ya que al igual que el nitrógeno forma parte de moléculas biológicas (ADN y ARN) y también sirviendo como transporte de energía celular mediante el Trifosfato de Adenosina (ATP). Este elemento en el suelo ha sido considerado por los agrónomos como inmóvil y está ligado a la fertilidad y producción de cosechas, pero es un elemento que escasea en las rocas que dan origen al suelo, por ello es que en suelos naturales hay mucha deficiencia de fósforo y deben ser incrementados por los fertilizantes en suelos agrícolas (44).

Los dos elementos mencionados se vuelven contaminantes cuando son aplicados excesivamente a los suelos agrícolas mediante los fertilizantes. Estos nutrientes logran filtrarse a aguas subterráneas o desplazarse a cuerpos de agua superficiales por la escorrentía, generando eutrofización o transportando altas concentraciones de nitrato. Los altos contenidos de nitrógeno tienen efectos sobre el rendimiento, aumentando la generación de clorofila, energía y alargamiento de raíces, que como resultado es

la proliferación de follaje, esto ocasiona desorden en plantas y provocando que sean más vulnerables a ataques de patógenos (35).

### **c) Plaguicidas**

Son productos químicos que se utilizan para combatir las plagas o controlarlas. En la actividad agrícola principalmente se utiliza los fungicidas, herbicidas, insecticidas, rodenticidas y nematocidas. A estas sustancias le acompañan perjuicios que son considerados una amenaza potencial a largo plazo en los ecosistemas que ocasiona una pérdida de biodiversidad y también consecuencias considerables en la salud humana (45).

Algunos de los plaguicidas han sido prohibidos en diferentes países por sus graves consecuencias, es el caso de los COP, que son contaminantes que pueden estar en un tiempo largo en el medio ambiente porque su disipación no es fácil ni rápida, entre estos encontramos al *DDT*, *Aldrín*, *Dialdrin*, *Clordano*, *Heptacloro*, *Mirex*, entre otros (46).

Por otro lado, los plaguicidas están ligados a la contaminación por metales, ya que están compuestos por Cu, Pb, Hg y Pb tanto inorgánicos como organometálicos. Las características de los plaguicidas como su movilidad, conducta y persistencia son altamente variables como son los mecanismos que intervienen en su retención y degradación en suelos: degradación química y biológica, adsorción y desorción, absorción por plantas y su filtración (47).

## **2.2.1.2. Actividades industriales como fuentes de contaminación**

### **a) Actividades industriales**

Este tipo de actividad es la que está relacionada con sustancias, las cuales se generan, transforman, consumen o

producen como un subproducto, utilizando diferentes fuentes de energía para todo el proceso (48).

La actividad industrial libera contaminantes a componentes de medio ambiente como la atmósfera, agua y suelo. Las emisiones que contienen contaminantes gaseosos son primero liberadas a la atmósfera e ingresan al recurso suelo de manera directa a través de lluvias ácidas y deposición atmosférica; de igual manera las descargas de las industrias son vertidas a cuerpos de agua que en su trayectoria pueden contaminar los suelos. Los metales pesados originados de actividades antropogénicas son también habituales en plantas industriales y pueden aparecer por polvos y derrames de productos finales, desechos, materia prima e incendios (35).

Principales actividades industriales generadoras de metales y contaminación de suelos.

**Tabla 3. Industrias generadoras de metales**

<b>Industria</b>	<b>Metales</b>	<b>Proceso y contaminación derivada</b>
Pinturas y pigmentos	Pb, As, Cr, Zn, Ti, Ba	Residuos acuosos procedentes de la fabricación y el deterioro de pintura vieja.
Aleaciones y aceros	Te, Pb, Ni, Cu, Zn, Cd, As	Fabricación, eliminación y reciclaje de metales. Relaves y escorias que contaminan el agua y el suelo.
Fundición	Pb, As, Cd, Ti	Procesado de mineral para obtener metales. Contaminación atmosférica.
Metalurgia	Cu, Cr, Mn, Zn, Pb, Sb	Procesado térmico de metales. Contaminación atmosférica.
Hidrocarburos	As, Cu, Cr, Fe, Hg, Ni, Pb, Ag, Mn	Proceso de exploración, explotación y refinación, generando contaminación de aguas superficiales, subterráneas y del suelo.
Minería de metales ferrosos	Cd, Cu, Ni, Cr, Co, Zn	Drenaje ácido de mina, relaves, escombreras. Generación de lodos que contaminan el suelo y agua.
Agricultura y ganadería	Cd, Cr, Pb, U, Zn, Mn, Cu	Contaminación de escorrentía, aguas superficiales y subterráneas. Productos de agroquímicos, la bioacumulación vegetal y animal.

Electrónica	Pb, Cd, Hg, Au, Cr, As, Ni, Mn	Residuos metálicos acuosos y sólidos desde el proceso de fabricación. Contaminación atmosférica e hídrica. Presentes en la mayoría de los procesos de mina.
Extracciones de minerales	As, Cd, Cu, Ni, Pb, Zn	Contaminación de aguas superficiales, subterráneas y los suelos.

*Nota:* tomada de Remoción de metales pesados comúnmente generados por la actividad industrial, empleando macrofitas neotropicales (49)

## **b) Actividades mineras**

La minería es una actividad que consiste en la explotación de los recursos minerales del suelo y es una de las actividades más importantes en el progreso de la humanidad. El papel que cumple la explotación y la utilización de rocas y minerales en la industria y la tecnología ha sido esencial desde tiempos prehistóricos para el desarrollo de los pueblos y aportó para el crecimiento económico de los países. Desde que empezó la revolución industrial la adquisición de estos productos minerales se ha incrementado de formas vertiginosas, que han generado impactos negativos tanto en lo social y ambiental (50).

En primera instancia, la minería contamina el agua, debido a que en el proceso de separación de metales que están en las rocas se emplean cantidades elevadas de agua que, al final del proceso, resulta con concentraciones altas de elementos metálicos como el cobre, cadmio, arsénico, mercurio, plomo, hierro, entre otros. El agua contaminada que se genera en las minas puede ser tratada para disminuir el contenido de metales, pero en muchos casos no es así, ocasionando que el agua contaminada toque cuerpos receptores como el suelo, donde estos la absorben juntamente con los contaminantes, dando como resultado un suelo con contenido de diversas sustancias químicas, modificando y alterando la calidad y la capacidad de producción de los suelos, y si se trata de suelos con capacidad de producción agrícola es más aun los impactos negativos. También pueden verse afectados suelos agrícolas cuando los desechos tóxicos de la minería son

aislados en lugares estériles, los cuales contienen partículas finas que presentan concentraciones de metales pesados, estos pueden ser desplazados por la acción eólica e hídrica, disponiéndose finalmente en suelos agrícolas (51).

Por otro lado, la minería puede afectar componentes del ambiente de 2 formas, que pueden actuar de manera individual o colectiva. La primera de forma física, principalmente en las zonas de impacto directo de la minera, donde desaparecen suelos por las excavaciones o existe compactación de suelo debido al almacenamiento de los relaves mineros, construcción de infraestructuras para procesos de tratamientos de minerales, área de oficina de logística, instalación de campamentos y vías de transporte para las maquinarias pesadas. Como segundo, se tiene de forma química, debido a los minerales que contienen metales con mayor valor económico en el mercado mundial, que son los sulfuros, estos se oxidan generando cargas metálicas en solución y necesitan ser drenados o transportados y que por descenso se trasladarían hasta los suelos (52).

### **2.2.2. Metales pesados en el sistema suelo**

La presencia de estos elementos en el ambiente se ha incrementado con el pasar de los años, volviéndolos potencialmente tóxicos en todos los ecosistemas y el incremento se debe principalmente a la acción del hombre. Mucho de los elementos metálicos sirven como micronutrientes para los seres vivos donde se incluyen al B, As, Co, Cr, Cu, Mo, Ni, Mn, Zn y Se, pero estos pueden volverse potencialmente tóxicos cuando presentan concentraciones altas, existen también elementos metálicos como el Cd, Hg, Pb, Ba, Sb y Bi, que no poseen ninguna función biológica esencial o conocida, por ello son tóxicos en concentraciones mínimas (53).

### 2.2.2.1. Dinámica de los metales pesados en el suelo

El metal cuando se encuentra en el suelo pasa por diversos procesos como la absorción, adsorción, complejación y precipitación. La salida del sistema suelo del metal se da mediante la volatilización, drenaje, extracción de cosecha y debido también al proceso de erosión. El resultado final de todos los procesos por los que pasa el metal es la retención y movilización, que convierte al suelo en una especie de sumidero o como fuente de estos elementos, esta capacidad del suelo de actuar sobre elementos metálicos influye sobre las soluciones acuosas que alcanzan las aguas superficiales y la capa freática, generando un impacto negativo a mayor o menor medida a las especies vegetales y animales que se encuentran en el suelo (54).

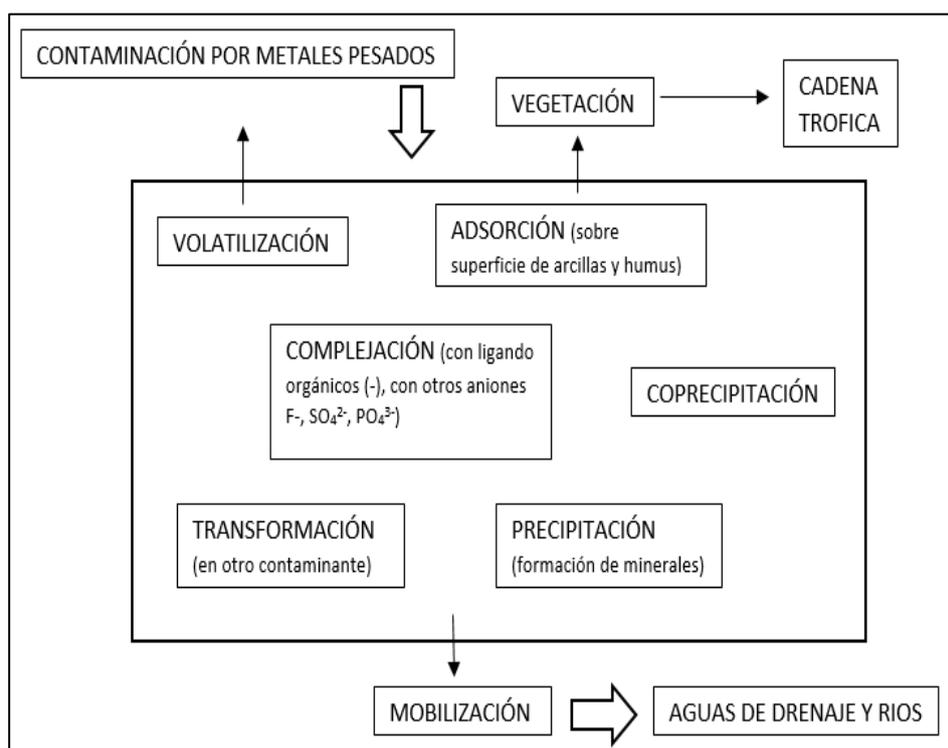


Figura 1. Dinámica de los metales pesados en el suelo (55)

#### c) Adsorción

Es un proceso donde se asocian sustancias como moléculas, átomos e iones a la superficie de los receptores, donde se denomina adsorbato a la sustancia que es adsorbida y adsorbente a la fase sólida de receptores (fase sólida del suelo),

este proceso de asociación se produce debido a las fuerzas de *van de Waals* y las fuerzas de enlace puente de iónico o hidrógeno (56).

La adsorción de los metales en la parte sólida del suelo va a depender de los parámetros fisicoquímicos como el pH y el adsorbente del metal. Como adsorbente, se encuentran a los minerales de arcilla que su capacidad de adsorción de metales es menor que los óxidos y la materia orgánica (57).

#### **d) Absorción**

La absorción de metales pesados es realizada esencialmente por las plantas, este es el primer paso para que los elementos metálicos se introduzcan en la cadena trófica. La absorción y acumulación que realiza la planta va a depender específicamente de la movilidad de los metales desde la solución del suelo hacia la raíz de la especie vegetal (40).

La absorción por medio de las raíces es el inicio del camino para que el metal ingrese hacia el interior de la planta, este proceso de absorción que realiza la planta mediante sus raíces puede ser pasiva (no metabólica) y también activa (metabólica). Se destacan a la micorriza por el papel primordial que cumplen en la transferencia de iones del medio externo hacia las raíces (58).

La disponibilidad de los metales para ser absorbidos por la planta va a depender si estas se encuentran disueltas en la solución suelo en formas iónicas, quelatos o complejos. La acción que cumplen los agentes quelantes y solubilizadores es esencial para que se formen complejos, que posteriormente serán transportados al interior de los tejidos radicales, donde el elemento metálico será reducido mediante una reductasa específica. La absorción va a depender en gran medida del pH del suelo y de la especie vegetal (59).

### **e) Volatilización**

Este proceso consiste en que el elemento metálico que se encuentra en el suelo ya sea en la solución suelo o en la fase sólida del suelo, es convertido a una fase gaseosa, siendo liberado a la atmósfera. La velocidad de volatilización va a depender por un lado de la concentración del metal y por otro lado del contenido de humedad, materia orgánica, arcilla y temperatura del suelo, también el contenido de arcilla y materia orgánica (7).

Muchas veces para realizar la metalización se requiere de mecanismos biológicos como la metilación, donde los metales son convertidos a derivados de metilados para que posteriormente puedan ser removidos por la volatilización. La metilación es un proceso que se realiza tanto en suelos como en ambientes acuáticos, que como resultado se tiene la detoxificación del metal y los derivados metilados son excretados desde las células y luego se volatilicen fácilmente. En el suelo, los microorganismos actúan como agentes metiladores, debido a que la materia orgánica del suelo provee fuente de grupo metilo para que se realice el proceso (60).

### **f) Complejación**

En el suelo los metales pesados van a exponerse a diferentes reacciones orgánicas o a la quelación debido a la actividad biológica que existe en el suelo, en ambas situaciones formando complejos. Los compuestos orgánicos tienen la característica de ceder electrones en la formación de complejos metálicos, entre estos están los carboxilos, fosfatos, alcóxidos, entre otros. La estabilidad de los complejos va a depender mucho de la carga de ion metálico, el carácter electronegativo que poseen los agentes complejantes y factores ambientales. El responsable de que se formen los complejos se le denomina quelación, es el mecanismo por el cual los átomos del metal en solución son atrapados por moléculas en forma de anillo (41).

### **2.2.2.2. Disponibilidad de los metales en el suelo**

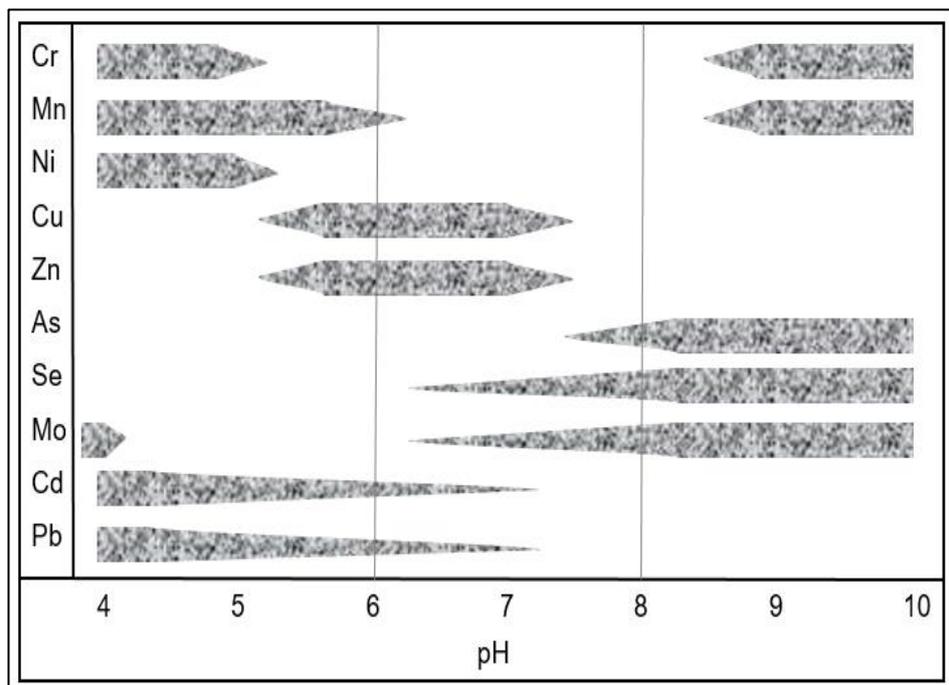
El término disponibilidad establece la medida de la tasa y extensión de la absorción de una sustancia que alcanza el sistema circulatorio de un organismo, en resumen, la extensión de su absorción y circulación sistémica por el organismo (61).

La disponibilidad para las plantas depende de la solubilidad y movilidad de los metales en solución suelo por lo que la concentración total de los metales en el suelo no refleja necesariamente los niveles de metales biodisponibles. La transferencia de metales pesados desde el suelo a la planta es un proceso complejo. Debido a que el suelo es un sistema dinámico sujeto a cambios físicos, químicos y biológicos. La disponibilidad de los metales está relacionada con el flujo del elemento hacia la planta, el cual depende de la concentración en la solución suelo y del transporte a través de este. El transporte y destino de los metales pesados en el suelo está determinado por el equilibrio entre los distintos componentes de este y la interacción entre los distintos procesos como adsorción / desorción, precipitación / disolución, extracción por las plantas, aporte del residuo, reincorporación / mineralización y transporte de solutos. Para la evaluación del impacto del aumento de un metal pesado en el sistema suelo-agua-planta es necesario conocer los distintos procesos asociados a su disponibilidad (62).

#### **a) Factores que alteran la disponibilidad**

Los factores que afectan la concentración de los metales en la solución suelo afectan su disponibilidad, por lo tanto, esta depende de la naturaleza del metal, de la interacción con los coloides del suelo, de las propiedades del suelo y del tiempo de contacto del suelo con el metal. Los principales factores del suelo que controlan la solubilidad y potencial disponibilidad de los metales en el suelo son pH, potencial redox, textura, contenido y aniones en solución (63).

**pH:** el pH del suelo es considerado uno de los principales factores que afecta la disponibilidad de la mayoría de los metales pesados al afectar el equilibrio entre la especiación metálica, solubilidad, adsorción e intercambio de iones en el suelo. Además, afecta el ingreso del metal a las raíces de las plantas (62). Por otra parte, las actividades humanas han inducido toda una serie de cambios en la acidez de los suelos, por medio de la utilización de fertilizantes químicos, la deposición atmosférica, residuos orgánicos que forman ácidos y la lluvia ácida. Relacionando este concepto con la contaminación de los suelos, los contaminantes añadidos por la actividad humana pueden acidificar el suelo, bien sea por vertidos o por oxidación de sulfuros y óxidos nitrosos, lo que aumenta la vulnerabilidad del suelo, la mayoría de los metales tienden a estar más disponibles a pH ácidos, a excepción de As, Mo, Se y Cr que lo están a pH alcalinos (64).



**Figura 2. Disponibilidad de metales pesados de acuerdo al pH (63)**

**Contenido de materia orgánica:** la materia orgánica juntamente con la arcilla del suelo y mediante una serie de reacción es fisicoquímica, adsorben los contaminantes y permiten su inmovilización o liberación. No obstante, la formación de complejos

y quelatos con los metales puede facilitar una mayor migración de estos a través de los horizontes del suelo. De esta forma, la complejación por parte de la materia orgánica del suelo es uno de los procesos que gobiernan la solubilidad y bioasimilación de los metales pesados. Así, la toxicidad de los metales pesados se ve potenciada por la tendencia hacia la formación de compuestos organometálicos, los cuales son más solubles, disponibles y dispersables, además de aumentar la persistencia de estos contaminantes en el suelo debido a la dificultad de degradación de los complejos formados (64).

**Potencial redox:** la condición de redox afecta el tipo de especies de metales en la solución suelo alterando su solubilidad. En el suelo compactado e inundados, que tienen poca aireación, se ven favorecidas las condiciones de reducción, incrementando la biodisponibilidad de algunos metales como Mn, Cd, Cu, Cr y Zn y aumentando su toxicidad (65).

**Presencia de cationes y aniones en la solución suelo:** la adsorción de cationes metálicos es un proceso selectivo que depende principalmente de la carga y radio iónico del catión, existiendo una competencia por los sitios de adsorción. La concentración de aniones tanto inorgánicos como orgánicos pueden formar complejos con los cationes metálicos y tal reacción puede afectar la biodisponibilidad de los metales (66).

**Otros factores:** hay otros factores que afectan la solubilidad de los metales pesados en el suelo y su biodisponibilidad para las plantas. La actividad de las raíces afecta la biodisponibilidad al bajar el pH rizosfera. Al exudar ácidos orgánicos se solubilizan los metales y su absorción por las plantas aumenta. Los exudados orgánicos de las raíces también pueden actuar como agentes complejantes de los metales y pueden movilizar los metales adsorbidos a la solución suelo (67).

## **b) Biodisponibilidad**

Es otro aspecto importante cuando es necesario evaluar la toxicidad de los oligoelementos. En el campo de la geología médica, la investigación sobre la biodisponibilidad y la evaluación del riesgo con herramientas importantes para investigar la influencia de las especies químicas en la salud humana y animal. La bioacumulación de oligoelementos es un aspecto importante en la cadena alimentaria que debe ser bien comprendido. En general, la bioacumulación podría definirse como el proceso mediante el cual los organismos adsorben sustancias químicas o elementos directamente del medio ambiente (68).

### **2.2.2.3. Toxicidad**

Los organismos del suelo y los procesos biológicos que ocurren en el suelo como la degradación de materia orgánica, fijación de nitrógeno y respiración pueden verse afectados por la presencia de metales pesados. Los microorganismos del suelo son más propensos a sufrir efectos de metales a comparación de animales de suelo y plantas. El principal problema para que exista un riesgo ecológico es que los metales se encuentren biodisponibles en el suelo (69).

El incremento de disponibilidad de elementos metálicos provoca en las plantas un tipo de estrés iónico. La disminución del crecimiento de plantas no es la disminución potencial osmótico de metal, sino es debido principalmente a la característica tóxica propia del metal pesado. Una concentración alta del metal o algunos de sus quelantes solubles provocan específicamente alteraciones bioquímicas y fisiológicas, como es la inhibición del desarrollo de la raíz (70).

Los elementos que son considerados los más peligrosos son el Cd, Pb, Cu, Sb, Hg, Cr, Ni y As, los efectos negativos que puedan

generar en las plantas y seres vivos va a depender de las características del suelo (55).

### **2.2.3. El cadmio en el suelo**

El cadmio es un elemento químico de la tabla periódica ( $\text{Cd}^{2+}$ ), con un número atómico de 48, se encuentra frecuentemente asociada con el zinc en el ambiente, en el suelo el promedio del cadmio se encuentra entre 0,07 y 1,1 mg/kg (71).

Este metal se acumula en la parte superficial de los suelos, pero también puede lograr trasladarse a la capa freática, permanece aproximadamente entre 15 a 1 100 años en el suelo cuando se trata de un problema a largo plazo y a un bajo pH puede incrementar su disponibilidad para ser absorbido por las plantas (56).

Los suelos pueden poseer diferentes cantidades de cadmio y esto se debe porque la procedencia del suelo está dada por una roca que contiene el cadmio en su composición. Por ejemplo, las rocas fosfóricas que son de donde se obtiene los fertilizantes fosfáticos, contiene en su composición diferentes niveles de cadmio que se diferencian según su origen geográfico, pero habitualmente son superiores a la concentración en la corteza terrestre (6).

En la corteza terrestre el cadmio se va a encontrar en combinación con cloruros, óxidos y sulfatos, formando parte de los minerales como greenockita ( $\text{CdS}$ ). En todo tipo de rocas, fertilizantes químicos, minerales y abono orgánico en general contienen trazas de cadmio en promedio de 1.5 a 10.5 % de concentración de cadmio (71).

El cadmio que ingresa al suelo de manera antropogénica está presente en la parte superficial del suelo y generalmente es más disponible que el cadmio que proviene de forma natural (meteorización de rocas), pero su facilidad de absorción por las plantas va a depender de las características del suelo y de la especie. Las condiciones que favorecen

el desplazamiento o movilidad del metal también facilitan la absorción por las plantas, pero lo que ayudan a retener el elemento en la matriz del suelo podrán reducir la disponibilidad del cadmio, esto sucede con el pH, que mientras mayor sea, mayor será la retención del cadmio (13).

La materia orgánica en el suelo incrementa la adsorción del cadmio, pero también puede tener un comportamiento opuesto en las disponibilidades del cadmio. Esto sucede cuando la fracción de MO que se encuentre soluble puede acomplejar al cadmio, generando que se facilite la movilidad del elemento en el suelo, también esta MO al mineralizarse ocasiona que el cadmio pueda encontrarse más disponible para las plantas. La fracción orgánica puede lograr cumplir con la acción de retener el cadmio y hacer que este no se encuentre disponible para las plantas, cuando se encuentra estabilizada y es resistente a la mineralización (72).

En la solución suelo se presentan diversas especies de cadmio, la principal es  $\text{Cd}^{2+}$ , pero aparece también como complejos catiónicos:  $\text{CdOH}^+$ ,  $\text{CdCl}^+$ ,  $\text{CdHCO}^{3+}$ ,  $\text{CdHS}^+$ , y como especies de complejos aniónicas:  $\text{CdCl}^{3-}$ ,  $\text{Cd}(\text{OH})^{3-}$ ,  $\text{Cd}(\text{OH})^{2-}$ ,  $\text{Cd}(\text{HS})^{2-}$ . En condiciones aerobias del suelo las especies de cadmio estarían dadas por suelos ácidos:  $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{CdSO}_4$ ,  $\text{CdCl}^{4+}$ , suelos alcalinos:  $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{CdCl}^+$  y  $\text{CdHCO}^{3+}$  (73).

### **2.2.3.1. Fuentes de exposición del cadmio**

#### **a) Naturales**

La fuente natural de donde proviene el cadmio es a partir de la meteorización de las rocas que contienen este elemento. Uno de los depósitos de zinc que contiene al cadmio son la esfalerita ( $\text{ZnS}$ ) y también los minerales que tienen baja importancia económica que contienen el cadmio son la greenockita ( $\text{CdS}$ ) y el óxido de cadmio ( $\text{CdO}$ ) (71).

El cadmio generalmente va a presentarse en los compuestos de zinc, con un contenido aproximadamente de 0,1 a 0,3% de cadmio. Por otro lado, también se encuentran en minerales de cobre y plomo, pero en estos minerales las concentraciones son menos que en los minerales de zinc (13).

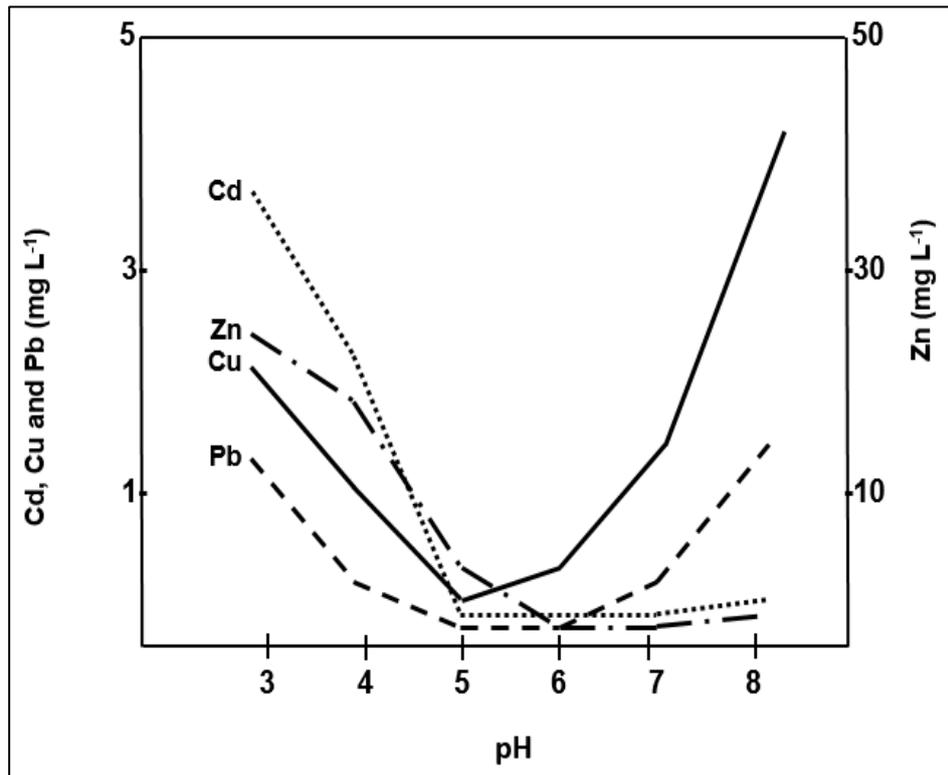
### **b) Antropogénicas**

La mayor concentración de cadmio que proviene de fuentes antrópicas es de tres actividades principalmente que realiza el hombre. La primera es la actividad minera de metales no ferrosos (subproducto de la obtención de zinc) que son una fuente que libera alta concentración de cadmio al ambiente, por medio del agua de drenado de las minas, aguas residuales provenientes del proceso de obtención de minerales y derrame de los depósitos de desechos de las minas. La segunda es la actividad minero-metalúrgica que son empleadas para procesar mineral polimetálico, este es el caso del cadmio, debido a que los minerales de cadmio no se encuentran en cantidades altas para justificar una actividad minera específica para este metal, como ejemplo de un mineral de cadmio se tiene al CdS que viene a ser el más común, este mineral es a menudo asociado al ZnS y de esta manera el cadmio se recupera como subproducto de la actividad minero-metalúrgica por medio de la fundición y refinación del zinc, pero también en menor grado en el caso de plomo y cobre, esta actividad va a generar emisiones atmosféricas y descargas de efluentes con concentraciones de cadmio, que van a alterar tanto al agua como al suelo. La otra actividad es la producción de fertilizantes fosfatados, donde el contenido de cadmio en los fertilizantes va a depender de la precedencia geográfica de las rocas que fueron usadas para la fabricación, debido a eso es que en los diversos fertilizantes pueden variar los contenidos de cadmio (6).

### **2.2.3.2. Disponibilidad del cadmio**

La disponibilidad del cadmio va a depender de la concentración de este en la solución suelo y en su capacidad de liberación de ion de la parte sólida del suelo a la parte soluble o solución, de donde son absorbidas a la planta. El cadmio tiene la característica de unirse fuertemente a los minerales de arcilla, óxidos de aluminio y la materia orgánica. Las reacciones que tiene el cadmio con los diferentes componentes del suelo para disminuir o aumentar su disponibilidad va a depender de factores como pH, textura, capacidad de intercambio catiónico (CIC), materia orgánica y reacciones redox del suelo (74).

El pH es uno de los factores más importantes en el comportamiento del cadmio en el suelo. En suelos que poseen un pH ácido el contenido de este metal pesado en la solución suelo es alta, mayormente en forma de cationes, esto se debe a dos causas. La primera es que en medios ácidos hay menor grupo de hidroxilos con los que el cadmio pueda coordinarse, entonces es menor la posibilidad de formar precipitados, que como resultado dan que el cadmio quede con menor fuerza para ser adsorbido. La segunda va referida a la acción directa que los iones de hidrógeno tienen sobre los compuestos precipitados y complejos orgánicos, ocasionando la liberación del cadmio hacia la solución suelo. Por otro lado, el cadmio va a tener más movilidad en el suelo cuando sea ácido en un rango de pH de 4,5 a 5,5 y en suelos alcalinos o que tengan un pH mayor al rango del que se mencionó, donde la capacidad de sorción del cadmio por el suelo incrementa, volviendo al Cd inmóvil (adsorbida) (75).



**Figura 3. Influencia de pH en la concentración de Cd en la solución suelo (75)**

En los diferentes suelos la dinámica de cadmio es altamente afectada por la variación del pH, cabe recalcar que en suelos ácidos el cadmio se encontrará en forma fácilmente intercambiable en el suelo y a la vez estará disponible para ser absorbido por las plantas (76).

La textura cumple un rol esencial en la acumulación y fijación del cadmio y de otros metales también, ya que las arcillas que se presenten en suelos arcillosos tienen la capacidad de adsorber y que así el cadmio pueda quedar retenido en el complejo de cambio. En suelos arenosos ocurre lo contrario, debido a que estos suelen carecer de la capacidad de fijar metales pesados como el cadmio, debido a ello pasan rápidamente a la solución suelo y al subsuelo, donde pueden perjudicar a las plantas y contaminar aguas freáticas (77).

La materia orgánica es otro factor que participa activamente en la sorción del cadmio, y esto no solo se debe a la cantidad que se puede encontrar de MO en el medio edáfico, sino también se debe a su composición que es determinante. La sorción del cadmio va a depender del tipo de materia orgánica presente en el suelo, si se trata de ácidos fúlvicos que son compuestos de bajo potencial de mineralización (PM), ocasionarán la movilización de quelatos a través de todo el perfil y a su vez su dispersión, si se trata de ácidos húmicos que son compuestos con un alto potencial de mineralización, lograrán la retención del cadmio y luego su liberación cuando la MO se mineralice (78).

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) está relacionado con la materia orgánica, debido a que cuando hay mayor presencia de MO, se incrementa el número de grupos funcionales (aumento de cargas) que son los responsables de la adsorción del cadmio. Por ello, cuando exista mayor capacidad de intercambio catiónico el suelo tendrá una mayor capacidad para fijar el cadmio y otros metales pesados (74).

Las reacciones redox en el suelo caracterizan los procesos en los que se genera un cambio en el estado de oxidación, lo que significa una transferencia de electrones de una especie a otra. Dicho potencial está vinculado con el pH. En el caso del cadmio, cuando existe una condición de oxidación la solubilidad disminuye al incrementarse el pH. En un suelo ácido la solubilidad del cadmio es mucho menor en condiciones reductoras que en oxidantes y eso se debe a la generación de sulfuros y complejos organominerales insolubles en el suelo (79).

### **2.2.3.3. Toxicidad del cadmio**

El cadmio tiene como característica principal que es bioacumulativo y muy persistente en el ambiente, que tiende a acumularse en la superficie del suelo, donde es considerado uno

de los metales más móviles tanto en el suelo como en ambientes acuáticos, como las aguas superficiales y subterráneas (80).

En las plantas el cadmio logra alterar el proceso metabólico, reduciendo en la especie vegetal la transpiración y la fotosíntesis y también incrementa la frecuencia respiratoria. Cuando las plantas están en un suelo con presencia de cadmio presentan una modificación en la apertura estomática e interfiere en la entrada, transporte y uso de elementos esenciales como el Ca, Mg, P, K y el agua, generando de esta manera un desequilibrio nutricional e hídrico de la especie vegetal (81).

El cadmio puede ingresar a la cadena trófica, terminando en el cuerpo del ser humano por vía respiratoria y oral, donde es transportado a la sangre y llegando a concentrarse en el hígado y riñón. El cadmio tiene la característica de acumularse en estos órganos generando graves problemas e irreversibles aun si solo son pequeñas concentraciones las que ingresan a los órganos. El tiempo de vida del cadmio específicamente en el riñón puede ser de hasta 30 años (39).

#### **2.2.3.4. El cadmio en la planta**

El cadmio ingresa mayormente a las especies vegetales en forma de  $Cd^{2+}$ , ya que las formas de iones quelatos no son disponibles para que la planta pueda absorberlas. El conjunto de capas epidérmicas viene a ser el primer tejido que se encuentra en contacto con los iones, dentro de estas capas los pelos radicales son la parte esencial donde se realiza de manera activa la absorción de iones del suelo de  $Cd^{2+}$  (82).

En las células de la planta no existe un mecanismo específico o único que cumpla el rol de transportar el cadmio hacia el interior de las células, esto debido a que este metal no es esencial para la nutrición de la especie vegetal. Sin embargo, el

transportador del calcio denominado LCT1, es la proteína responsable de brindar el pase del cadmio hacia el interior de la célula de la planta (83).

#### **a) Transporte de cadmio hacia la raíz**

La absorción de nutrientes y agua es una función indispensable para la planta que es realizada por medio de las raíces, por eso las raíces están expuestas a diferentes tensiones como es el caso del cadmio. Una importante labor de las raíces es poder evitar la absorción de sustancias tóxicas de la solución suelo, que puedan perjudicar la absorción de nutrientes y del agua. La capa epidérmica cumple un rol importante también porque muchas veces resiste las tensiones (84).

Existen tres tipos de vías por donde el cadmio presente en la solución suelo puede ingresar a las raíces:

**La primera vía:** esto se realiza cuando en las células epidérmicas de la raíz, el  $\text{CO}_2$  pasa por una disociación donde se genera el  $\text{H}^+$  y  $\text{HCO}_3^-$ , esto mediante la respiración de la especie vegetal. Entonces el  $\text{H}^+$  va a intercambiarse con el ion  $\text{Cd}^{2+}$  y de esta manera el metal puede ser absorbido por las células epidérmicas de la raíz. Este proceso no requiere de ningún gasto de energía, debido a que la absorción es rápida (85).

**La segunda vía:** se sabe que el cadmio no es un elemento esencial para la nutrición de la planta, por ende las plantas no tienen mecanismo de entrada específicos para este elemento metálico. Por ello, el cadmio entra a las células de las plantas mediante los transportadores de elementos esenciales  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$  y  $\text{Ca}^{2+}$  (ZIP), entre estos transportadores se tiene el caso de las proteínas IRT1 y IRT2. Después de que el cadmio se combine con las proteínas, este ingresa a la capa de epidermis de la raíz mediante las vías de simplasto (86).

**La tercera vía:** las raíces de las plantas realizan un proceso para aumentar la disponibilidad de iones en el suelo de la rizosfera, donde secretan compuestos de muy baja masa molecular, por ejemplo, los ácidos mugineicos (MA), estos logran formar complejos con el  $\text{Cd}^{2+}$ , de esta forma el cadmio logra ingresar a la capa de la epidermis de la raíz mediante el apoyo de un transportador, en este caso es la proteína tipo YSL en forma de quelatos (84).

Otra familia de transportadores que están implicados en el transporte del cadmio son los Nramp (Nramp1, Nramp3, Nramp4 y Nramp5) que está ubicada en su mayoría en la membrana vacuola, por lo cual cumple una función de movilización del cadmio, pero no el ingreso de este metal hacia la raíz. El Nramp1 en ocasiones puede participar en la absorción y transporte del cadmio, mientras que Nramp5 y Nramp1, son los que mayormente transportan el cadmio ya en el interior de las células (86).

Cuando el cadmio ya está dentro de las células pueden llegar a quelatizarse con ligandos de azufre, como por ejemplo el glutatión (GSH) o también con las fitoquelatinas (PC). También se puede mencionar a otras moléculas que interviene en la quelación del elemento cadmio, como es el caso de las proteínas que son ricas en cisteína denominadas metalotioneínas (MT). De esta manera, los complejos de cadmio y ligandos son acumulados en las vacuolas y también transportados a otras células de la planta (83).

Dentro de las vacuolas también se va a encontrar el cadmio, esto se debe al transportador HMA3 que es la responsable del secuestro del metal, el cadmio se almacena en la vacuola transitoriamente en forma de complejos. Este almacenamiento disminuye la movilidad del cadmio en las células y la traslocación del cadmio de las raíces hacia las hojas (87).

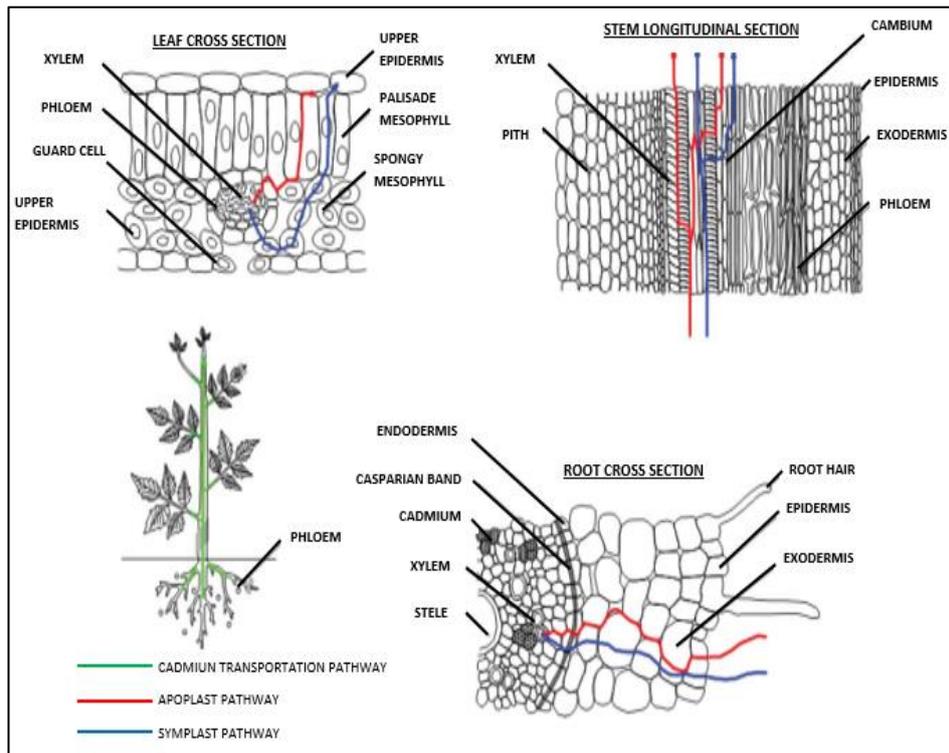
El HMA3 tiene un rol importante en las vacuolas de las células de la raíz, ya que son las que van a controlar la traslocación del cadmio hacia la parte aérea de la planta. La traslocación del cadmio de las raíces hacia la xilema y posteriormente hacia la parte aérea va a ser realizada por el HMA4. También el HMA4 va a realizar la transferencia del cadmio de la xilema al floema (89).

Por otro lado, los transportadores de cationes denominados los CAX, toman un papel importante en el transporte del calcio a la vacuola y también vienen a transportar otros elementos metálicos como es el caso del cadmio (89).

#### **b) Transporte del cadmio de la raíz a la xilema**

Después de que el cadmio pase por las diversas barreras que se presentan desde la superficie de la raíz hacia la corteza de la misma, dentro de estas barreras se encuentran incluidas las apoplásmicas, como es la franja de Caspari que está ubicada en la endodermis, después de estas barreras los iones de cadmio ingresan en los simplásmicos y van a ser transportados por proteínas hasta la estela y xilema, estas xilemas contienen parte de espacios apoplásmicos (90).

La traslocación del elemento metálico está dada esencialmente por la retención que pueda haber en las raíces y la carga del ion metálico en la xilema. La retención será realizada a través de los quelantes de cadmio (fitoquelatinas), el secuestro que se realiza en las vacuolas y las barreras apoplásmicas. Aunque cabe resaltar que las fitoquelatinas y otros tioles se juntan en mayor cantidad al cadmio que está en la raíz (91).



**Figura 4. Absorción y transporte del cadmio desde las raíces hacia las hojas por medio de vías apoplásticas (línea roja) y simplásticas (línea azul) (85)**

El transportador HMA2 va a presentarse de manera predominante en el sistema vascular en las células de las raíces y viene a ser una enzima que ayuda a la traslocación del cadmio. Muchas veces la pérdida de la función del HMA2 en mutante de inserción genera la disminución de la concentración de cadmio en la parte aérea de la planta (87).

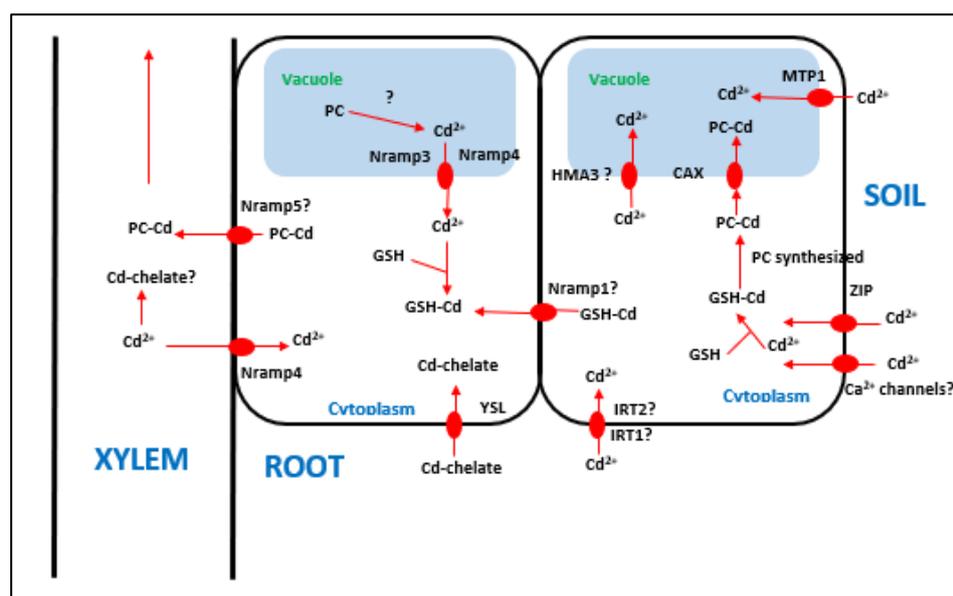
### **c) Transporte de cadmio a la superficie de tejidos**

El desplazamiento del cadmio de la parte de la raíz hacia la parte del tallo va a estar controlada mediante 3 procesos: el secuestro del ion metálico en las células de las raíces específicamente en las vacuolas; el transporte del metal hacia la estela y la liberación del metal en la parte de la xilema (92).

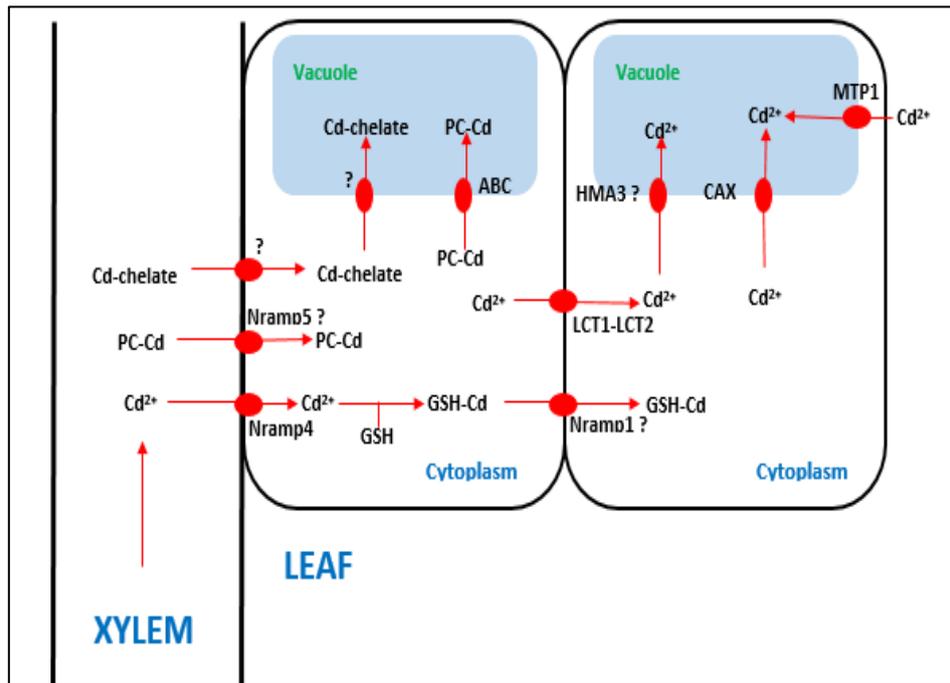
El floema viene a ser un conducto de larga distancia por donde los complejos de cadmio-fitoquelatina y Cd-glutación se desplazan hacia la parte aérea. La carga de la xilema de la planta

va a ser un proceso que va a estar regulado por las proteínas transportadoras. En muchos casos de condiciones normales los incrementos de la capacidad de intercambio catiónico en las paredes celulares de la xilema generarán la reducción del transporte de iones metálicos. En especies hiperacumuladoras el proceso de complejación que sufren los metales con los quelantes de bajo peso molecular ocasionará que la traslocación hacia la parte aérea sea más fácil mediante la transpiración (93).

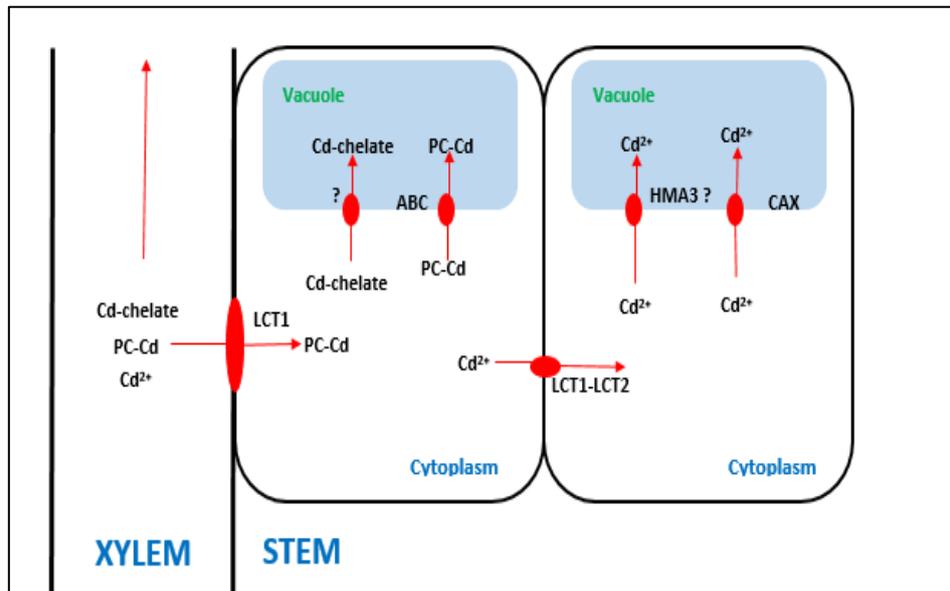
El tráfico de los metales se va a producir en el interior de cada célula vegetal, de esta manera se mantiene las concentraciones de estas moléculas dentro de las condiciones fisiológicas específicas y los rangos de cada orgánulo, de esta manera se asegura la entrega de metales a las proteínas que haga falta iones metálicos. En las especies de hiperacumuladoras, el proceso de complejación de metales con ligandos orgánicos, genera una alta tolerancia a los elementos metálicos. Los tejidos de las hojas secuestran los metales mediante los compartimentos extracelulares y subcelulares. Los tipos de células donde se van a depositar los metales van a ser diferentes según el tipo de metal y la especie vegetal que á absorbiendo los metales (83).



**Figura 5. Mecanismo de regulación subyacente al transporte del Cd en los tallos de la planta; absorción en las células del tallo; por vacuolas y carga de la xilema (85)**



**Figura 6. Mecanismo de regulación subyacentes al transporte del Cd en las raíces de la planta; absorción en las células de la raíz; retención en las raíces por vacuolas y carga de la xilema (85)**



**Figura 7. Mecanismo de regulación subyacentes al transporte del Cd en las hojas de la planta; absorción en las células de la hoja; retención en las hojas por vacuolas (85)**

La planta de *Zea mays L.* se cultiva en suelos contaminados con metales pesados, esta especie acumula el metal en la epidermis específicamente en las capas celulares, donde la concentración del metal se incrementa con el tiempo. Bajo estrés por metales, la suberización surge más cerca de la punta de la raíz

y genera como resultado el incremento de la deposición suberina, debido a la oxidación estrés. Independientemente de la estructura de la especie vegetal, las capas de células epidérmicas en todas las especies son consideradas como tejidos absorbentes. La capa epidérmica no solo es el primer tejido para absorber iones metálicos, sino también posee un sistema de membrana bien elaborado o más activo (transportadores) (94).

#### **2.2.4. Tecnologías de remediación de suelos contaminados con metales pesados**

Para la recuperación de suelos degradados debido a la actividad antrópica supone la utilización de varias tecnologías o estrategias cuyo impacto puede, a la vez, repercutir en la propia funcionalidad del suelo (47). Esta serie de operaciones unitarias o conjuntas puede alterar la composición de una sustancia peligrosa o contaminante a través de acciones químicas, físicas y biológicas de manera que reduzcan la toxicidad, movilidad o volumen del material contaminado. Por lo que las tecnologías de remediación representan una gran alternativa a la disposición en tierra de residuos peligrosos sin tratamiento (95).

Las técnicas fisicoquímicas tienen la ventaja de ser aplicables a una gran diversidad de contaminantes dentro del suelo y de utilizar plazos cortos para la eliminación de la contaminación, sin embargo, son agresivas para el medio edáfico y en general requieren aplicaciones *ex situ* (47). Sin embargo, las estrategias biológicas, conocidas como biorremediación, hacen uso de sistemas vivos, plantas o microorganismos, en el sentido literal significa “dar remedio” mediante procesos biológicos. Por lo tanto, estos procesos se basan en la eliminación de contaminantes orgánicos o inorgánicos del medio mediante, la acción de seres vivos, como microorganismos (bacterias, algas unicelulares, levaduras), hongos, plantas y enzimas derivadas de ellos. Cuando son las plantas encargadas de transformar o eliminar los contaminantes se está frente a la fitorremediación (33).

A diferencia de los contaminantes orgánicos, los metales pesados no pueden descomponerse fácilmente por vía biológica, física o química, de manera que la remediación de suelos contaminados con estos metales se limita al confinamiento de estos residuos o a la alteración de su solubilidad, movilidad o toxicidad, a través de cambios dentro de su estado de valencia, lo que favorece su inmovilización o movilización (7).

#### **2.2.4.1. Clasificación de tecnologías de remediación**

Las tecnologías de remediación pueden clasificarse en diferentes maneras: con base en el desarrollo (tradicional e innovadoras), al lugar donde se realiza (*in situ* y *ex situ*), y en base a la alteración de propiedades del contaminante (separación / inmovilización o disolución / movilización) (7).

##### **a) Estado de desarrollo**

**Tecnología tradicional:** para estas tecnologías existe suficiente información disponible acerca de sus costos y desempeño. La finalidad de estos métodos es limitar la disponibilidad y movilidad de los metales contenidos en los residuos sólidos de zonas mineras. Sin embargo, muchas de estas tecnologías no reducen la toxicidad o el volumen de los metales pesados (95).

**Tecnologías innovadoras:** son tecnologías de tratamiento alternativas, cuyo número de aplicaciones está limitada a la información acerca de datos relativos a costos y desempeño. La aplicación de este tipo de tecnologías surgió como resultado de la observación de que los humedales (*wetlands*) removían, de manera natural, metales contenidos en aguas. Este tipo de métodos tiene gran potencial para la remediación de suelos de manera más efectiva en cuanto a costos y a su desempeño. La fitorremediación es una tecnología innovadora, con relativamente pocas, pero crecientes aplicaciones (47).

## b) Lugar de tratamiento

Lugar de realización del proceso de remediación, las tecnologías se pueden clasificar en tecnologías *in situ* y *ex situ*.

***In situ***: son las aplicaciones en las que el suelo contaminado es tratado, o bien, los contaminantes son removidos del suelo contaminado, sin necesidad de excavar el sitio, lo cual genera una disminución de los costos. Este tratamiento por lo general requiere de períodos largos (96).

***Ex situ***: la realización de este tipo de tecnologías requiere de excavación, dragado o cualquier otro proceso para remover el suelo contaminado. Este tipo de tratamientos en general requiere de períodos cortos y presenta una mayor certeza en la uniformidad de los procesos empleados, debido a que se puede conseguir una adecuada homogenización del suelo. Existe un mejor manejo del suelo contaminado (mezclado, tamizado) (7).

**Tabla 4. Ventajas y desventajas de las tecnologías de remediación (*in situ*) y (*ex situ*)**

	<b><i>In situ</i></b>	<b><i>Ex situ</i></b>
<b>Ventajas</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Permite tratar el suelo sin necesidad de excavar ni transportar.</li><li>- Potencial disminución en costos</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Menor tiempo de tratamiento.</li><li>- Más seguros en cuanto a uniformidad: es posible homogenizar y muestrear periódicamente.</li></ul>
<b>Desventajas</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Mayores tiempos de tratamiento.</li><li>- Pueden ser inseguros en cuanto a uniformidad: heterogeneidad en las características del suelo.</li><li>- Dificultad para verificar la eficiencia del proceso.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Necesidad de excavar el suelo.</li><li>- Aumento en costos e ingeniería para equipos.</li><li>- Debe considerar la manipulación del metal y la posible exposición al contaminante.</li></ul>

*Nota*: tomada de Suelos contaminados por metales y metaloides (7)

## c) Alteración de propiedades del contaminante

**Extracción o separación**: este método consiste en que los contaminantes van a ser extraídos o separados del medio contaminado, mediante el aprovechamiento de sus propiedades físicas y químicas (volatilización, solubilidad, carga eléctrica) (7).

**Inmovilización:** este proceso consiste en concentrar los EPT en suelos contaminados mediante la inmovilización, para poder prevenir su dispersión. El producto final concentrado debe disponerse, de tal manera que sea controlado o reciclado para que después el metal pueda recuperarse. Este tipo de tecnología incluye la contención de contaminantes mediante el uso de cubiertas, fitorremediación y métodos de S/E como microencapsulación, vitrificación, entre otros (97).

**Movilización:** los elementos potencialmente tóxicos (EPT) presentes en sedimentos, residuos sólidos o en el suelo, con esta tecnología van a removerse de la matriz sólida mediante su disolución en una fase acuosa, para su seguida concentración, con la utilización de estrategias de bombeo-tratamiento. Las tecnologías que se incluyen dentro de este proceso viene a ser las siguientes: extracción química, lavado e inundación de suelos y biolixiviación (98).

#### **2.2.4.2. Tipos de tratamiento**

##### **a) Tratamiento fisicoquímico**

Estos tratamientos fisicoquímicos utilizan las propiedades físicas o químicas de los contaminantes o del medio contaminado para transformar, separar o inmovilizar el contaminante. Son tratamientos económicamente accesibles y la mayoría se encuentra disponible comercialmente, siendo las técnicas más empleadas para la remediación de diferentes medios contaminados. Estas tecnologías involucran una variedad de procesos como: neutralización, filtración, precipitación oxidación / reducción, sorción, evaporación y floculación (95).

##### **b) Tratamiento biológico**

El termino biorremediación se utiliza para describir una variedad de sistemas que utilizan el potencial metabólico de

organismos vivos (plantas, hongos, bacterias, entre otros) para limpiar ambientes contaminados (47).

**Tabla 5. Ventajas y desventajas de las tecnologías de remediación**

	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
<b>Tratamientos biológicos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Son efectivos en cuanto a costos.</li> <li>- Son tecnologías más benéficas para el medio ambiente.</li> <li>- Los contaminantes generalmente son destruidos.</li> <li>- Se requiere un mínimo o ningún tratamiento posterior.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Requieren mayores tiempos de tratamiento.</li> <li>- Es necesario verificar la toxicidad de intermediarios o productos.</li> <li>- No pueden emplearse si el tipo de suelo no favorece el crecimiento microbiano</li> <li>- Los residuos generados por técnicas de separación deben tratarse o disponerse: aumento en costos y necesidad de permisos.</li> </ul>
<b>Tratamientos fisicoquímicos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Son efectivos en cuanto a costos.</li> <li>- Pueden realizarse en períodos cortos.</li> <li>- El equipo es accesible y no se necesita de mucha energía ni ingeniería.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Los fluidos de extracción pueden aumentar la movilidad de los contaminantes: necesidad de sistemas de recuperación.</li> </ul>

*Nota:* tomada de Introducción a la contaminación de suelos (47)

A las técnicas biológicas para la remediación de suelos, también se les conoce como la técnica de biorremediación. Esta biorremediación de los suelos contaminados puede realizarse con la ayuda de biofiltros, biorreactores o por compostaje. También se puede adicionar nutrientes para mejorar la tasa de biodegradación natural o se adicionan microorganismos más eficientes para la degradación. Una de las técnicas biológicas que más atención a recibido es la fitorremediación que tiene como objetivo degradar, asimilar, metabolizar o desintoxicar metales pesados, compuestos orgánicos y compuestos radioactivos por medio de la acción de plantas y microorganismos con capacidad fisiológica y bioquímica para absorber, retener, degradar o transformar sustancias contaminantes a formas menos tóxicas para el medio ambiente (99).

### **2.2.4.3. Factores que inciden en los procesos de tratamiento**

Para la aplicación de cualquier tecnología de remediación, es vital conocer algunas características, tanto del suelo, como del contaminante y de los organismos vivos (plantas, hongos, bacterias, etc.) presentes en el medio. De esta manera, los procesos de remediación dependen de estos tres factores que deben encontrarse en equilibrio. La obtención de esta información requiere de muestreo y análisis de las características físicas y químicas que se describen (100).

#### **a) Factores del suelo**

Dentro de los factores más importantes para la remediación de un suelo las condiciones ambientales y las características fisicoquímicas del suelo.

**Temperatura:** es un parámetro que puede afectar las propiedades del contaminante, así como la velocidad de un proceso de biorremediación, ya que la velocidad de las reacciones enzimáticas dependen de esta (7).

**Humedad:** la humedad puede afectar los procesos de biorremediación, debido a que, todos los microorganismos necesitan agua para subsistir, debe existir en balance, ya que si el contenido de agua es muy bajo, la actividad microbiana se detiene, y si es muy alto, disminuye el intercambio gaseoso a través del suelo (101).

**Tipo de suelo:** la capacidad de retención de agua de un suelo varía en función de las fracciones orgánicas y minerales. En general, los materiales no consolidados (arena, y gravas finas) son más fáciles de tratar. A mayor tamaño de partículas en la fracción mineral, la permeabilidad y la aireación son mayores. La capacidad de retención de agua en un suelo aumenta proporcionalmente al contenido de materia orgánica. Un suelo con alto contenido húmico

disminuye la movilidad de compuestos orgánicos y con ello la eficiencia de ciertas tecnologías (96).

**pH:** esto afecta directamente la solubilidad y disponibilidad de macro y micronutrientes, la movilidad de metales y la reactividad de minerales. En general, los metales son móviles a pH bajo, en forma de especies iónicas libres y como órgano-metales solubles; al pH alcalino forman carbonatos o fosfatos minerales insolubles (101).

**Aceptores de electrones:** su presencia es importante para la aplicación de tecnologías de biorremediación. La mayoría de estos son compuestos inorgánicos oxidados, como  $O_2$ ,  $NO_3^{2-}$ ,  $Mn^{4+}$ ,  $Fe^{3+}$ ,  $SO_4^{2-}$  y  $CO_2$  (96).

**Potencial redox:** miden la oxidación relativa de una solución acuosa y normalmente se encuentran controlados por el contenido de humedad del suelo. En ambiente anaeróbico reducidos, los metales precipitan debido a la presencia de iones ferrosos y carbonatos; en cambio, bajo condiciones oxidantes, los metales se hacen más solubles (7).

**Permeabilidad:** se refiere a la facilidad o dificultad con la que un líquido puede fluir a través de un medio permeable. La permeabilidad de un suelo es uno de los factores que controla la efectividad de tecnologías *in situ*. Por lo general, una baja permeabilidad en el suelo disminuye la efectividad de la mayoría de las tecnologías de remediación (101).

### 2.2.5. Fitorremediación

Los avances tecnológicos para sanear ambientes contaminados por metales pesados han conducido al desarrollo de alternativas que se basan en el empleo de organismos vivos para poder prevenir o restaurar daños provocados por acciones antropogénicas que llegan a alterar la

estabilidad de los diferentes ecosistemas. Por ese sentido, resalta la biorremediación, que es un procedimiento natural capaz de eliminar contaminantes orgánicos e inorgánicos dentro de un determinado medio, dada su capacidad de utilizar compuestos presentes en su entorno y transformarlos en precursores de sus constituyentes celulares (102).

El término de la fitorremediación se refiere a una tecnología innovadora que hace uso de plantas vivas y los microorganismos asociados a su rizosfera para la remediación *in situ* o *ex situ* de suelos, lodos, sedimentos y aguas contaminadas a través del proceso de remoción, degradación o estabilización de los contaminantes presentes (7).

La fitorremediación es un tipo de remediación mediante el uso de plantas para poder recuperar suelos que han sido contaminados con metales, una de sus ventajas es que es una metodología *in situ* no destructiva y de muy bajo costo. Ha adquirido mayor utilización durante los últimos años debido a que es un procedimiento pasivo, estéticamente agradable y eficiente en remediar simultáneamente diversos contaminantes orgánicos, inorgánicos y biológicos. Cabe resaltar que en este proceso de descontaminación la especie vegetal puede transferir, remover, estabilizar, descomponer o degradar contaminantes presentes en el suelo como los metales pesados, plaguicidas, hidrocarburos, explosivos, fertilizantes, para que de esta manera puedan estar más biodisponibles para las especies vegetales, de diversas familias y con una densidad variada (32).

La fitorremediación aplica a suelos contaminados con elementos o compuestos inorgánicos, incluye básicamente seis mecanismos: la fitoextracción o fitoacumulación, la fitoestabilización, la fitovolatilización, fitoinmovilización, fitodegradación, rizofiltración (47).

### **a) Fitoextracción o fitoacumulación**

Hace referencia a la concentración y traslocación, a través de las raíces de contaminantes metabólicos presentes en el suelo hacia diferentes partes cultivables de la planta, dando como resultado la limpieza permanente del sitio. Es una tecnología muy reconocida entre todas las de este tipo. Algunas plantas llamadas hiperacumuladoras tienen la capacidad para acumular concentraciones de metales 10 500 veces mayores que otras especies, alcanzando de 1% al 5% del peso de la planta (17).

### **b) Fitoestabilización o fitoinmovilización**

Es el uso de ciertas especies de plantas para inmovilizar contaminantes presentes en los suelos a través de su absorción y acumulación en las raíces, adsorción en las raíces o precipitación por la presencia de exudados. Estos mecanismos conducen a la estabilización física de los suelos a través de una reducción en la movilidad, toxicidad o biodisponibilidad. Las plantas usadas con este fin deben ser especies no comestibles o especies en las que la traslocación de metales a la parte de los tejidos sea mínima (103).

### **c) Fitovolatilización**

Implica la captación de contaminantes volátiles por las plantas y su posterior volatilización o liberación en forma original o modificada a la atmósfera. Esta acción puede tener ventajas sobre la fitoextracción debido a que no es necesaria la cosecha ni tampoco la disposición de la biomasa, pero es una de las tecnologías más controversiales por la liberación de metales a la atmósfera (104).

### **d) Fitodegradación**

También conocida como fitotransformación, es la quebradura de los contaminantes absorbidos por las plantas a través de procesos metabólicos, se utiliza para tratar a contaminantes orgánicos como los hidrocarburos aromáticos polinucleares, hidrocarburos totales del petróleo, plaguicidas, compuestos clorados, explosivos y surfactantes

(detergentes). Dentro de este proceso los contaminantes son parcial o completamente degradados o transformados a través de reacciones enzimáticas que realizan las propias plantas y también los microorganismos, lo cual permite que sean asimilados por las mismas y retenidos en sus vacuolas, o fijados a estructuras celulares como la lignina. Estos contaminantes son degradados y luego incorporados dentro de los tejidos de las plantas y lo utilizan como nutrientes, o los almacenan o degradan bioquímicamente a productos menos perjudiciales (105).

#### **e) Rizofiltración**

Es un proceso de absorción en la raíz a los contaminantes que se encuentran en la zona que la rodea, para ello las plantas que se emplean son producidas en invernaderos y sembradas en la zona contaminada, donde las raíces van a tomar el agua junto con el contaminante. Se basa principalmente en hacer crecer en cultivos hidropónicos raíces de plantas terrestres con alta tasa de crecimiento y área superficial, para absorber, concentrar y precipitar metales de aguas residuales contaminadas (105).

##### **2.2.5.1. Fitoextracción de metales**

La fitoextracción de los metales del suelo, hasta los últimos tiempos, es uno de los campos con mayor avance científico y tecnológico. Mientras se dé el proceso, el contaminante debe encontrarse biodisponible para que la absorción por la raíz pueda ocurrir. La traslocación del contaminante desde la raíz a los demás brotes de la planta. Para mejorar el proceso de fitoextracción, la biodisponibilidad del contaminante hacia la raíz puede facilitarse a través de la adición de agentes acidificantes, fertilizantes o quelantes (106).

##### **2.2.5.2. Factores de bioacumulación y traslocación en la fitorremediación**

Frecuentemente, para hacer una elección de las especies vegetales útiles en la remediación, las variables de mayor interés son la concentración de Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT)

en la parte aérea de la planta y radical, y los factores de bioacumulación. Por lo que si se opta por la fitoestabilización se recomienda que las plantas empleadas sean excluidoras de EPT, o acumulen muy bajas concentraciones de los contaminantes en su parte aérea. Con ello se busca que la mayor concentración de EPT esté inmovilizado en la rizosfera o en la raíz misma. Pero en el uso de la fitoextracción, lo que se busca es que las plantas acumulen altas concentración de EPT, en la parte aérea, estas son plantas acumuladoras. Para una extracción eficiente y económicamente rentable, las plantas deben ser hiperacumuladoras (107).

Para poder hacer una clasificación, se realiza una determinación de la concentración de EPT en la raíz y la parte aérea de la planta, así como en el suelo, y a partir de esta información se pueden obtener los factores de bioacumulación (108). Los más comunes son el factor de bioconcentración (FBC) y el factor de traslocación (FT).

#### **a) Factor de bioconcentración en la raíz de la planta**

El factor de bioconcentración (FBC) en la raíz es la relación de la concentración de EPT en la raíz entre la concentración de EPT en el suelo (109).

$$FBC = \frac{\text{Concentración de EPT en parte radicular}}{\text{Concentración de EPT en el suelo}}$$

Si el FBC raíz < 1 la planta es excluyente.

Si el FBC raíz > 1 la planta es acumuladora.

Si el FBC raíz > 10 la planta es hiperacumuladora.

### **b) Factor de bioconcentración en la parte aérea de la planta**

El factor de bioconcentración (FBC) en la parte aérea es la relación de la concentración de EPT en la parte aérea entre la concentración de EPT en el suelo (110).

$$FBC = \frac{\text{Concentración de EPT en parte aérea}}{\text{Concentración de EPT en el suelo}}$$

Si el FBC aérea < 1 la planta es acumuladora.

Si el 1 < FBC aérea < 10 la planta es acumuladora.

Si el FBC aérea > 10 la planta es hiperacumuladora.

### **c) Factor de traslocación en la raíz de la planta**

El factor de traslocación (FT) es la relación de la concentración de EPT en la parte aérea respecto a la concentración en la raíz.

Si el valor de FT < 1 significa que la mayor parte del contaminante se acumula en la raíz y no se transloca hacia la parte aérea. En este caso la planta es (exclusora). Si el FT > 1 el contaminante se almacena en la parte aérea y no en la raíz de la planta, por lo que la planta es acumuladora. Aunque son sencillos de aplicar los criterios de clasificación, en la realidad puede no serlo (33).

#### **2.2.6. Maíz (*Zea mays* L.)**

El maíz, en su posición sistemática, se denomina como *Zea mays*, con diversas variedades y razas.

**Tabla 6. Taxonomía del *Zea mays* L.**

<b>Taxonomía del <i>Zea mays</i> L.</b>	
Reino	<i>Plantae</i>
División	<i>Magnoliophyta</i>
Clase	<i>Liliopsida</i>
Subclase	<i>Commelinidae</i>
Orden	<i>Poales</i>
Familia	<i>Poaceae</i>
Subfamilia	<i>Panicoideae</i>
Tribu	<i>Andropogoneae</i>
Género	<i>Zea</i>
Especie	<i>Zea mays</i> L.

*Nota:* tomada de Introducción a la contaminación de suelos (32)

**a) Raíces:** presenta numerosas raíces adventicias que brotan de los nudos inferiores y que dirigiéndose al suelo se fijan fuertemente (32).

**b) Tallos:** es herbáceo, recto, cilíndrico, en su base presenta nudos y entrenudos bien diferenciados, desarrolla raíces adventicias en los nudos inferiores (32).

**c) Hojas:** son simples, alternas cortantes, alargadas y estrechas, paralelinervias y con una larga vaina en forma de envoltura, y están constituidas de vaina, cuello y lámina. La vaina es una estructura cilíndrica, abierta hasta la base, que sale de la parte superior del nudo. El cuello es la zona de transición entre la vaina envolvente y la lámina abierta y la lámina es una banda que termina en un ápice muy agudo (32).

**d) Flores:** el maíz es una planta monoica, por tanto, tiene flores masculinas y femeninas, en el mismo pie de la planta la inflorescencia masculina se presenta en forma de panoja terminal y cada flor que es apétala, tiene tres estambres protegidos por brácteas. Las flores femeninas se disponen en las axilas de las hojas en un eje grueso y están cubiertas por brácteas protectoras dando lugar esa inflorescencia a un tipo especial de espiga (32).

**e) Fruto:** el fruto y la semilla forman un solo cuerpo: el grano de maíz es un fruto pequeño, seco, y contiene un solo cotiledón (32).

## Etapas de crecimiento

El ciclo de desarrollo del maíz es el conjunto de fases que van desde la germinación de la semilla hasta la floración y formación del fruto. Este ciclo comprende dos etapas bien definidas: desarrollo vegetativo y desarrollo reproductivo.

**Tabla 7. Etapas del crecimiento del maíz (*Zea mays L.*)**

Etapas		Días		Características
Etapas vegetativas	Emergencia	VE	5	El coleóptilo emerge de la superficie del suelo.
	Primera hoja	V1	9	Es visible el cuello de la primera hoja.
	Segunda hoja	V2	12	Es visible el cuello de la segunda hoja.
	Tercera hoja	V3	16	Es visible el cuello de la tercera hoja.
	Enésima hoja	Vn		Es visible el cuello de la hoja número "n" ("n" es equivalente al número de hojas que tiene la planta, la cual fluctúa entre 16 y 22 hojas, pero para la floración se habrán perdido las 4 o 5 hojas de más abajo)
	Aparición de las panojas	VT	55	Es completamente visible la última rama de la panoja.
Etapas reproductivas	Aparición de los estigmas	R1	57	Antesis o floración masculina, el polen se comienza a arrojar.
	Blíster	R2	59	Son visibles los estigmas.
	Grano lechoso	R3	71	Etapas de ampolla. Los granos se llenan con un líquido claro y se puede ver el embrión.
	Grano pastoso	R4	80	Etapas lechosas. Los granos se llenan con un líquido lechoso blanco.
	Grano dentado	R5	90	Etapas dentadas. La parte superior de los granos se llenan con almidón sólido.
	Grano maduro	R6	102	Madurez fisiológica. Una capa negra es visible en la base del grano. La humedad del grano es generalmente alrededor del 35%.

*Nota:* tomada de Duración de las etapas fenológicas y profundidad radicular del cultivo de maíz (111)

### 2.2.6.1. Fitorremediación del *Zea mays L*

La mayoría de las plantas fitorremediadoras no se trata de especies poco comunes, sino de cultivos nativos y conocidos, tal como el caso del girasol (*Heliantus annus*) que es capaz de absorber grandes cantidades de uranio del suelo y el maíz (*Zea mays*) con un gran potencial para la acumulación de cadmio y plomo (112).

La planta de maíz (*Zea mays L.*) es utilizada en la fitorremediación para remover, transferir, estabilizar, concentrar contaminantes orgánicos o inorgánicos en los suelos. Estos contaminantes se incorporan a la planta de *Zea mays* en su forma disuelta, y favorece el proceso de asimilación por las raíces que a partir de sus exudaciones modifican las condiciones ambientales en la parte de la rizosfera, como el pH, el potencial redox (8).

**Tabla 8. Acumulación de los metales en la rizosfera del maíz**

Acumulación de los metales en la rizosfera del maíz	1. Interceptación radicular, al incrementarse el sistema radicular de la planta se va incrementando su volumen radicular y por ello se intercepta un volumen cada vez mayor de solución suelo.
	2. Flujo de masas, está enfocado en el movimiento del agua y los nutrientes de la solución hacia la raíz. Este proceso se da debido a la pérdida de agua por la transpiración, lo cual genera una fuerza de succión por la diferencia de presión de agua entre el interior y exterior de planta.
	3. Difusión, es un proceso espontáneo por el que ocurre un movimiento de los iones por un gradiente de potencial químico de una solución de mayor concentración a una de menor. Este mecanismo de movimiento es importante para los iones de alta energía.

*Nota:* tomada de Efecto de la aplicación de estiércol de lombriz en la disponibilidad de arsénico y cromo (31)

### **a) Absorción de los metales en la rizosfera del *Zea mays L***

Dentro del sistema suelo, cuando las sales entran en contacto con el sistema radicular se inicia un proceso de absorción en sí. Se produce primero una rápida absorción que no es selectiva (mecanismos pasivos de absorción) seguida de una absorción más lenta y selectiva (mecanismo activos de absorción) (113).

Estos mecanismos pasivos de absorción son procesos exergónicos fácilmente reversibles y no selectivos, por lo cual se considera que su participación en el proceso de absorción total es mínima. Dentro de estos mecanismos esta: difusión, intercambio iónico, equilibrio de Donnan y flujo de masas. Dentro del transporte activo, en cambio, las partículas son transportadas activamente contra un gradiente de concentración o de potencial electroquímico, por lo que requiere aporte de energía externa, la cual esta suministrada por el metabolismo celular (114).

También hay participación de mecanismos de difusión facilitada, como: canales iónicos y proteínas translocadoras, las características comunes de estos dos mecanismos son que solo permiten que los solutos atraviesen la membrana a favor de un gradiente de concentración. A pesar de que existen mecanismos transportadores específicos para ciertos iones, algunos iones similares compiten por el mismo sitio de enlace en una molécula transportadora; para los casos de toxicidad por los metales, el efecto tóxico podría deberse a una competencia con nutrientes fundamentales para la planta (115).

La bioconcentración en la raíz se da principalmente por la facilidad que tiene la raíz para poder absorber el metal pesado en comparación con el transporte o traslocación de un metal pesado hacia los diferentes órganos de la parte aérea de la planta; esto debido a que la raíz constituye el tejido de entrada principal de metales pesados de la planta, los mismos que logran llegar hasta ella, a través de tres procesos principalmente que vienen a ser la difusión en el medio, flujo masivo o intercambió catiónico (116).

#### **b) Traslocación de los metales desde la raíz a la parte aérea del *Zea mays L***

Este proceso no tiene mucha explicación. Pero es posible que exista un equilibrio de quelación entre los cationes y moléculas quelantes que son ácidos orgánicos y aminoácidos, que están presentes en el jugo xilemático. La quelación es un proceso de complejación en donde un ion metálico forma enlaces covalentes con moléculas orgánicas. La capacidad de quelación y complejación en el maíz es alta, más aún si se trata de una variedad adaptada a suelos potencialmente contaminados. Aún no se ha logrado determinar con exactitud el nivel de acumulación en las raicillas de los contaminantes (117).

El transporte de metales pesados hacia la parte aérea (fitoextracción) solo existe una ruta, que es mediante el xilema, a diferencia de las diversas formas de ingreso de metales pesados a la parte radicular de la planta, y sobre todo que, aparte de ello, para la traslocación se requiere dos fuerzas para que esto ocurra, que son la osmosis y la fuerza de succión, las cuales no dependen propiamente de la planta ni del suelo, en este caso depende de la presión osmótica y de la pérdida de agua respectivamente (116).

#### **2.2.6.2. Influencia del cadmio en el crecimiento del maíz (*Zea mays L.*)**

En general el elemento cadmio interfiere en la entrada, transporte y utilización de elementos esenciales como son el Ca, Mg, P, K y el agua, lo cual provoca un desequilibrio nutricional e hídrico en la planta. El Cd también reduce la adsorción de nitratos y el transporte de la raíz hacia la parte exterior, además de inhibir la actividad nitrato reductasa en los tallos. Las plantas expuestas a suelos con cadmio presentan modificaciones en la apertura estomática, fotosíntesis y transpiración (118).

El cadmio, es el metal más soluble y peligroso, por lo que, en las plantas, los síntomas de toxicidad por Cd son atrofia y clorosis. La clorosis puede aparecer debido a una interacción directa o indirecta con el Fe, Zn, P y el Mn. La atrofia perjudica al crecimiento y desarrollo de las partes de la planta y aparición de algunas malformaciones (119).

#### **2.2.7. Enmiendas orgánicas**

Los suelos contaminados por metales pesados pueden también recuperarse *in situ*, añadiendo sustancias orgánicas e inorgánicas y mezclando con los horizontes del suelo para transformar los contaminantes. Por lo que la aplicación de carbonatos, zeolitas, fosfatos, minerales de hierro, bentonitas, hidróxido cálcico, compost o levaduras

también ha sido empleada para inmovilizar y reducir la disponibilidad de los metales como el Pb, As, Zn, Ni, Sr, Cu, Cd (120).

Los mecanismos de secuestro de metales en los suelos contaminados por estas enmiendas no se conocen por completo, aunque los experimentos de campo indican la eficiencia de estos tratamientos de inmovilización. Las enmiendas promueven el secuestro de metales en formas no hábiles en el suelo, atrapados en las estructuras de las arcillas o complejados por enlaces covalentes, entonces la inmovilización de los metales pueden ser mucho más duraderas (121).

#### **2.2.7.1. Uso de enmiendas en la fitorremediación**

Las técnicas de estabilización incluyen el uso de enmiendas que logren inmovilizar los elementos potenciales tóxicos (EPT). La estabilización de EPT se logra mediante la aplicación de enmiendas al suelo o a los residuos que contienen altas concentraciones de contaminantes. Con enmienda se hace referencia a la incorporación o aplicación de materiales que intervienen en los procesos fisicoquímicos de los EPT en el suelo. Esta técnica también es conocida como inmovilización *in situ* de EPT, inactivación de EPT o estabilización. Las enmiendas pueden absorber, precipitar, modificar la especiación (forma química del contaminante) y formar complejos con los EPT. También alteran sus propiedades físicas y químicas, por lo que disminuye la transferencia de EPT a niveles tróficos superiores (122).

##### **a) Uso de enmiendas para estabilizar EPT**

La estabilización química de EPT a través de enmiendas se ha considerado como una alternativa viable y económica para la remediación de suelos. Ya que esta tiene la ventaja de que se puede aplicar tanto *in situ* como *ex situ*. La primordial es reducir la disponibilidad y movilidad de los EPT en el suelo contaminado. En el caso de los residuos de mina, la aplicación de estas enmiendas permite hacer un preacondicionamiento del residuo al bajar su

toxicidad y mejorar sus propiedades físicas y químicas, para después introducir plantas (9).

Las enmiendas también aceleran los procesos de inmovilización que incluyen: sorción, precipitación, complejación y reacciones redox. Pero también se puede incrementar la solubilidad de algunos componentes tóxicos, tal como las sustancias húmicas forman complejos estables e insolubles con los contaminantes del suelo, disminuyendo su disponibilidad mientras que los ácidos fúlvicos pueden formar complejos organometálicos solubles con los contaminantes, con un peso molecular menor, aumentando su solubilidad, disponibilidad y dispersión (123); por lo que para su aplicación a larga escala es necesario realizar pruebas piloto con evaluaciones a través del tiempo. Entre las enmiendas más estudiadas tenemos a los fosfatos, calcita, dolomita, cenizas, arcillas, óxidos, hidróxidos y zeolitas (124). La adición de materiales orgánicos también se ha analizado como enmiendas útiles en la estabilización de EPT, como el estiércol, compost, vermicompost y biochar (122). Para la selección de una enmienda se debe considerar que el proceso de adsorción puede ser reversible y que, aun así, los EPT se precipiten o adsorben, existe la posibilidad de que se disuelvan o liberen nuevamente. Esto va a depender de las condiciones físicas, químicas y biológicas prevalecientes en el suelo contaminado y la enmienda aplicada. Se recomienda que la evaluación de enmiendas incluya un tratamiento testigo y un suelo no contaminado para evitar efectos colaterales, como la inmovilización de elementos nutritivos. Las enmiendas deben producirse en abundancia y no tener problemas de adquisición en la zona donde se pretende aplicar, además de tener un bajo costo (121).

#### **2.2.8. Vermicompost**

La materia orgánica agregada al suelo afecta la movilidad de los metales que pueden o no pueden servir como nutrientes de las plantas.

La adición de materia orgánica al suelo puede disminuir o incrementar la disponibilidad de los metales, solubilidad y la absorción por la planta. La materia orgánica insoluble forma complejos organometales insolubles o adsorbe iones metálicos, haciéndolo menos disponibles para la absorción por la planta. Muchas enmiendas tienen un componente de carbono soluble o genera productos de descomposición solubles, y la materia orgánica soluble puede incrementar la solubilidad al formar complejos órgano-metales solubles. La influencia de la materia orgánica sobre la movilidad de los metales también puede ser modificado por el pH de la solución (125).

La fracción orgánica de los suelos se origina de la biomasa que es característica de un suelo activo. Los componentes orgánicos muertos y los organismos vivos son incluidos en el término materia orgánica del suelo (MOS), la materia orgánica se refiere confusamente solo a la fracción no viva producida por la degradación y descomposición de plantas y animales. Este material muerto se divide en: materiales degradados en las cuales la parte anatómica de las plantas aún son visibles, y material completamente descompuesto. El primer grupo, los materiales degradados, es significativo en la física del suelo. Sin embargo, de la parte química del suelo, esta fracción orgánica no descompuesta es químicamente de menor importancia debido a que exhibe su estructura intacta y un área superficial relativamente pequeña dejándolo inactivo como un adsorbente. Cuando este tipo de materia orgánica está unida con la parte superficial del suelo, se utiliza el termino *litter*. En suelos forestales y de pastos, el *litter* es particularmente importante en el proceso del ciclo de nutrientes. El segundo grupo, la fracción descompuesta, llamada humus, está constituida de sustancias humificadas y no humificadas, y es importante dentro de la química del suelo, aunque su naturaleza y acumulación en los suelos depende del tipo y la cantidad de material vegetal original (126).

El término humus fue definido por Stevenson, como la fracción orgánica total en los suelos, exclusivamente de plantas no

descompuestas y material animal, sus productos de descomposición parcial, y la biomasa del suelo (127). Muchos de los investigadores y científicos consideran que el humus también es un material del suelo oscuro, coloidal y amorfo compuesto de fracciones orgánicas complejas de origen microbial, vegetal y animal. La presencia del humus promueve el desarrollo de plantas, animales y biodiversidad microbial. Las fracciones orgánicas complejas del humus, incluye sustancias sintetizadas y subproductos de microorganismos, como las sustancias húmicas (126).

El estiércol de lombriz o vermicompost está constituido por excrementos de un tipo de lombrices que se dedican especialmente a transformar los residuos orgánicos y también a los que producen las lombrices de tierra como sus desechos de digestión. Esto es uno de los abonos orgánicos de mejor calidad debido a su efecto en las propiedades biológicas del suelo, debido a la gran flora microbiana que contiene: dos billones de colonias de bacterias por gramo de vermicompost, en vez de los pocos centenares de millones presentes en la misma cantidad anual fermentado, lo cual permite que se realice la producción de enzimas importantes para la evolución de la materia orgánica del suelo. Además, por el alto contenido de ácidos fúlvicos favorecen la asimilación de los nutrientes minerales de las plantas. También permite mejorar la estructura del suelo favoreciendo la aireación, permeabilidad, retención de humedad y disminución de la compactación del suelo (128).

Para la obtención del vermicompost, es un proceso de compostaje rápido, también denominado vermicompostaje, en la cual camadas de algunas especies de lombrices de tierra son agregadas para poder ayudar a la transformación del material orgánico previamente preparado. El vermicompost consiste esencialmente de residuos eliminado por las lombrices de tierra que comen las materias orgánicas en pilas aireadas y húmedas. Las pilas son mantenidas superficialmente para evitar que el calor pueda matar a las lombrices (129).

Esta materia orgánica sufre una serie de transformaciones bioquímicas y microbiológicas al pasar por el intestino de las lombrices de tierra. Está constituida por carbono, hidrógeno y oxígeno, al igual de una gran cantidad de microorganismos. Siendo una sustancia color oscuro generalmente, aunque puede variar su coloración debido al origen del material que sirvió de alimento, como el estiércol de ganado vacuno, avino, porcino, equino, etc. (130).

El mejor estiércol para la reproducción de la lombriz roja es de equino y de ganado vacuno, debe tener un período de maduración de 6-7 meses, no se debe utilizar un estiércol de ave ya que es muy ácido, dificultando su ingesta por las lombrices (61).

#### **2.2.8.1. Características del vermicompost**

El humus a diferencia de las compostas tiene una elevada carga microbiana que beneficia a las plantas, produciendo abono orgánico de alta calidad, a la vez mejorando la composición y estructura del suelo; el vermicompost debe su enorme calidad, a la flora bacteriana que contiene y debería ser nombrado con más propiedad como un elemento corrector. El pH del vermicompost es siempre neutro y constituye un neutralizador de los suelos, debido a que las lombrices segregan una sustancia que es conocida como carbonato de calcio la cual neutraliza los ácidos de sus alimentos. Debido a que el pH es neutro, se crea un medio desfavorable para la proliferación de ciertos parásitos (31).

Incrementa la disponibilidad de elementos esenciales como nitrógeno, fósforo y azufre. A la vez inhibe el crecimiento de hongos y bacterias que afectan a las plantas. Inactiva los residuos de plaguicidas gracias a su capacidad de absorción. Mejora la capacidad de intercambio catiónico. Además, al igual que la arcilla forma complejos absorbentes, lo que incrementa la reserva de elementos nutritivos para las plantas. Por lo tanto, el empleo de

humus hacia la planta puede generar mayor absorción y en mayor cantidad de elementos fertilizantes que en su ausencia (131).

Además, le proporciona un color oscuro al suelo, la cual favorece la absorción de los rayos solares, por lo tanto, un aumento de la temperatura. Actúa también como un moderador de las variaciones térmicas en el suelo. Es el principal responsable de la granulometría del suelo, dando una mayor porosidad, y favoreciendo la aireación y drenaje. Por su retención de agua, mantiene al suelo húmedo disminuyendo la evapotranspiración. El vermicompost es considerado un agente preventivo ante la erosión (31).

Al final del proceso el vermicompost debe presentar ciertas condiciones físicas, un contenido de materia orgánica parcialmente humificada, contenidos variables de nutrientes y fitoreguladores de crecimiento. Las enmiendas orgánicas vermicompost, un producto estabilizado obtenido a partir de materiales orgánicos, y por digestión con lombrices, bajo condiciones controladas, debe cumplir las siguientes condiciones físicas y químicas (132).

**Tabla 9. Condiciones físicas mínimas del vermicompost**

<b>Indicador</b>	<b>Valor</b>
Materia orgánica (%)	40
Humedad (%)	30 - 40
Relación carbono / nitrógeno	< 20
Tamaño de partículas	90% para malla 25 mm

Nota: tomada de Biodegradación de alperujo utilizando hongos del género pleorotus y anélidos de la especie eisenia foetida (132)

### **a) Sustancias húmicas**

Comprende una mezcla heterogénea de macromoléculas que son relativamente resistentes a la degradación y al ataque químico. Las sustancias húmicas (SH) se caracterizan por su color que va desde el amarillo al negro, su variado peso molecular, la presencia de grupos funcionales oxigenados como: carboxílicos, OH fenólicos y enólicos, OH alcohólicos y C=O de quinonas, y por

ser altamente refractarias. Estas son propagadas en el medio natural, encontrándose tanto en medios terrestres y acuáticos, y esta representa el 60% – 70% de la materia orgánica del suelo y el 30% – 50% de la materia orgánica del agua superficial (133).

Se dividen en tres categorías, las cuales son definidas operacionalmente a la heterogeneidad de estas, y en función de su solubilidad en medios acuosos en función del pH: ácidos húmicos (AH), ácidos fúlvicos (AF) y humina (31).

### **Ácido húmico (AH)**

Los ácidos húmicos comprenden una mezcla de ácidos orgánicos de débiles alifáticos (cadenas de carbono) y aromáticos (anillos de carbono) que no son solubles en agua bajo condiciones acidas, pero si son solubles en agua bajo condiciones alcalinas. Los ácidos húmicos consisten en esa fracción de sustancias húmicas que precipitan de soluciones acuosas cuando el pH disminuye por debajo de 2. Los AH son polidispersores térmicos por sus características químicas variables. De un aspecto tridimensional estos carbonos complejos contienen componentes que son considerados polímeros lineales flexibles que existen como cadenas aleatorias con enlaces cruzados entre sí (134).

En promedio el 35% de las moléculas de los AH con aromáticos (anillos de carbono), mientras que los componentes residuales son moléculas alifáticas (cadenas de carbono). Los polímeros de AH se mezclan con arcilla para formar compuestos orgánicos estables de arcilla. Los poros periféricos en un polímero son capaces de acomodar fácilmente químicos orgánicos, naturales y sintéticos. Los AH forman fácilmente sales con elementos minerales traza inorgánicos. Un análisis de los extractos de AH ocurridos naturalmente va a revelar la presencia de más de 60 elementos minerales diferentes presentes. Estos elementos trazan están unidos a las moléculas de AH en una forma que puede

usarse fácilmente por varios organismos vivos. Por lo que la función del AH es tan importante como los sistemas de intercambio de iones y sistemas de metales complejos llamadas quelantes (131).

### **Ácido fúlvico (AF)**

Estos ácidos son una mezcla de ácidos orgánicos (alifáticos débiles y aromáticos) las cuales son solubles en agua en todas las condiciones de pH (ácido, neutro y alcalino). La composición y forma es variable. El tamaño de ácidos fúlvicos es más chico que los ácidos húmicos. Los AF tienen un contenido de oxígeno dos veces mayor que el de los AH. También tienen grupos carboxilos (COOH) e hidroxilos (COH), en consecuencia, estos AF son más reactivos químicamente. La capacidad de intercambio de AF es el doble que el de AH. Esta alta capacidad de intercambio se debe al número total de los grupos carboxilos presentes (113).

Los AF son colectados de muchos lugares y posteriormente analizados, y no muestran evidencia de grupos metoxi (CH<sub>3</sub>) son bajos en fenoles y son menos aromáticos que los AH. Por el tamaño minúsculo que presentan las moléculas de AF pueden ingresar rápidamente a las raíces de plantas, tallos y hojas (135).

Mientras ingresan a las plantas llevan minerales traza a la parte superficial de los tejidos de la planta. Los AF son un ingrediente clave de fertilizantes foliares de mucha calidad. Los rociadores foliares contienen minerales quelatos AF, en estados específicos del crecimiento de la planta, pueden ser usados como una técnica de producción primaria para maximizar la capacidad de productividad de la planta. Una vez aplicado al follaje, los AF transportan minerales traza directamente a lugares metabólicos en las células de la planta. Los AF son el compuesto quelante que contiene carbón, más efectivo conocido. Son compatibles con la planta, además no son tóxicos cuando son aplicados en concentraciones bajas (31).

## **Humatos**

Los humatos son sales metálicas de AH o AF. Dentro de cualquier sustancia húmica hay un largo número de moléculas complejas de humatos. La formación de los humatos está basada en la habilidad de los grupos carboxilos (COOH) e hidroxilos (OH) fuera de los polímeros, en expulsar los iones de hidrógeno. Una vez que los iones de hidrógeno son expulsados, resulta una unión cargada negativamente (COO<sup>-</sup>-CO<sup>-</sup>). Dos de estos aniones puede unirse a cationes de metal positivo, como hierro, cobre, zinc, calcio, magnesio. La reacción simplificada procede a unir dos aniones que quedaría así (COO + Fe<sup>++</sup> >> COO Fe<sup>+</sup> + H), frecuentemente es un grupo COOH y un grupo COH. La composición de humatos en cualquier sustancia húmica es específica para cada sustancia. Sin embargo, existen una larga variabilidad en la composición molecular de diferentes sustancias húmicas. Se espera que los humatos de diferentes depósitos minerales tengan características únicas (61).

### **b) Sustancias húmicas y su interacción con los metales**

Entre las sustancias húmicas, los ácidos húmicos y fúlvicos poseen diferentes tipos de grupos funcionales a los cuales pueden enlazarse los iones. Hay dos grupos principales de grupos funcionales con particular importancia: los grupos carboxilos y fenólicos, que a su vez son los que otorgan las características ácido base a estas sustancias (31).

#### **2.2.9. Compost**

El compost es el producto que se obtiene de compuestos que formaron parte de seres vivos de origen animal y vegetal, constituye un grado medio de descomposición de la materia orgánica, utilizado como buen abono orgánico, se pueden utilizar restos de cosechas, podas, restos de procesos agroindustriales, desechos urbano y la adición de estiércol y purines de animales (33).

También se entiende por compost a la reunión de un conjunto de restos orgánicos que sufre un proceso de fermentación y da un producto de color marrón oscuro con un olor particular a humus. La producción de esta enmienda es una práctica que viene realizando desde tiempos inmemoriales ya que la naturaleza produce humus espontáneamente, los agricultores de diferentes culturas antiguas han emulado esta forma de producir humus por parte del medio natural descomponiendo restos orgánicos (30).

La producción del compost es un proceso biológico el cual se convierte residuos en materia orgánica estable, por la acción de diversos microorganismos, las principales fuentes para el compost incluyen el tratamiento de residuos agropecuarios, desechos de jardinería y cocina, residuos sólidos municipales y lodos (136).

La FAO define al compost como la mezcla de materia orgánica en descomposición en condiciones aeróbicas que se emplea para mejorar la estructura del suelo y proporcionar nutrientes, el proceso de compostaje incluye diferentes etapas que deben cumplirse para poder obtener compost de buena calidad (137).

Debido a su materia orgánica, el compost posee la facultad de enmendar las características del suelo, en lo que a características físicas se refiere, contribuyendo a la estabilidad de su estructura, aumentando su capacidad de retención de agua, mejorando la porosidad, la infiltración y la permeabilidad, en tanto que la acción química del compost se manifiesta por su capacidad de intercambio catiónico superior a la de cualquier arcilla, también suministra a las plantas elementos básicos y oligoelementos en porcentajes pequeños, además por su efecto de oxidación lenta, produce gas carbónico, lo que contribuye a solubilizar algunos elementos minerales del suelo, y esto facilita la asimilación de las plantas, por otro lado, la actividad biológica del suelo se ve favorecida por el aporte de bacterias y sobre todo su riqueza en materia orgánica, la cual

favorece el desarrollo de los microorganismos del mismo suelo, que con su actividad estimulan el crecimiento de las plantas (138).

Un correcto proceso de compostaje pasa por una etapa termófila en la que se induce a la producción inicial de fitotoxinas, se producen cantidades de calor alcanzando temperaturas de 30 °C – 70 °C, que decrece rápidamente hasta los 35 °C – 40 °C durante la siguiente etapa de estabilización, si la temperatura alcanzada en la primera etapa es insuficiente, el desarrollo del proceso es desfavorable, ya que la producción metabólica de fitotoxinas caracteriza la etapa inicial de descomposición de la materia orgánica fresca. Dentro de un proceso de compostaje, los responsables de la transformación son los microorganismos, todos los factores que pueden limitar su desarrollo serán limitados también del propio proceso, los parámetros que afectan al sistema biológico son: temperatura, humedad, pH, aireación, y otros relacionados a la naturaleza del sustrato. El factor más importante a tener en cuenta para la calidad del compost es su madurez, por lo cual existen muchos métodos para medir la madurez del compost (139).

**Tabla 10. Clasificación de los métodos de evaluación de la madurez del compost**  
**Métodos de evaluación de la madurez en compost**

Métodos físicos	Olor Temperatura Color
Métodos Químicos	Relación C/N Relación C/N en el extracto acuoso Relación N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> /N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> en extracto acuoso Variación del contenido en polisacáridos Presencia de compuestos reductores Contenido de cenizas Determinación de sustancias orgánicas degradables Grado de descomposición Variación del pH Análisis del contenido en ácido volátil Capacidad de intercambio catiónico (CIC) Porcentaje de descomposición
Métodos microbiológicos	Indicadores de actividad microbiana Métodos respirométricos DQO DBO Test de germinación Test de crecimiento
Métodos de análisis espectroscópicos	GC-MS FTIR

Métodos en el grado de humificación	Cromatografía circular Extracción de sustancias húmicas Densidad óptica (DO) en extracto de pirofosfato
-------------------------------------	---

*Nota:* tomada de Compost and vermicompost of olive cake to bioremediate triazines-contaminated soil (139)

La utilización de un compost genera efectos benéficos tales como: el aporte de nutrientes y microorganismos, estimulando el desarrollo radicular e incrementa el microbiota rizosfera con efecto biocontrolador. Al aplicar al suelo el compost, se introduce una alta variedad de microorganismos implicados en el ciclo de diferentes nutrientes y en procesos de biocontrol de fitopatógenos. También cumple un rol muy importante en la recuperación de suelos, cuya microbiota ha sido alterada por la adición de compuestos fitosanitarios, en este proceso el compost contribuye a la reinoculación de microorganismos implicados en el ciclo de los nutrientes (140).

Adema el compost mejora las características del suelo, que haya sido deteriorado por el uso excesivo de agroquímicos y su sobreexplotación, sin embargo, su composición química, el aporte de nutrientes a los cultivos y su efecto en el suelo, pueden variar según su manejo, procedencia, madurez y contenido de humedad, muchas sustancias encontradas inmaduras pueden producir reacciones negativas en el desarrollo de las plantas y en los agroecosistemas, las cuales dependen de la fuente del material empleado y del proceso de compostaje (33).

### 2.3. Base Legal

**Constitución Política de Perú del año 1993**; en el artículo 2, se redacta que “toda persona tiene derecho a la vida, a su bienestar, a su integridad moral, psíquica y física y a su libre desarrollo y bienestar”; en el artículo 192 se menciona que “los gobiernos regionales tienen la competencia en la promoción del desarrollo y la economía regional, fomentar las inversiones, actividades y servicios públicos de su responsabilidad, que a su vez estos vayan acorde con las políticas y planes nacionales y locales de desarrollo, con el objetivo de promover y regular actividades o servicios en los diversos sectores (turismo,

energía, minería, agricultura, industria, pesquería, agroindustria, comercio, comunicaciones, educación, salud y medio ambiente)” (141).

**Ley N.º 28611, Ley General del Ambiente;** en el artículo 66, se redacta que “la salud ambiental; la prevención de riesgos y daños a la salud de las personas es prioritario en la gestión ambiental; la política nacional de salud incorpora la política de salud ambiental como área prioritaria, a fin de velar por la minimización de riesgos ambientales derivados de las actividades y materias comprendidas bajo el ámbito de ese sector”, por otro lado, en el artículo 113, se menciona que “toda persona natural o jurídica, pública o privada, tiene el deber de contribuir a prevenir, controlar y recuperar la calidad del ambiente y de sus componentes” (142).

**Estándar de calidad ambiental para Suelo, D. S. N.º 011-2017-MINAM;** que en el artículo 3, se redacta que; “de superación de los ECA para suelo; de superarse los ECA para suelo, en aquellos parámetros asociados a las actividades productivas, extractivas y de servicios, las personas naturales y jurídicas a cargos de estas deben realizar acciones de evaluación y, de ser el caso, ejecutar acciones de remediación de sitios contaminados, con la finalidad de proteger la salud de las personas y el ambiente” (143).

**Tabla 11. Estándar de calidad ambiental (ECA) para suelo**

Parámetros En mg/kg Ps	Usos del suelo			Método de ensayo
	Suelo agrícola	Suelo residencial / parques	Suelo comercial / industrial / extractivos	
<b>Inorgánicos</b>				
Cadmio	1,4	10	22	EPA 3050 EPA 3051

*Nota: tomada de Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para suelo (143)*

## 2.4. Metodología

### 2.4.1. Protocolo de muestreo

#### 2.4.1.1. Muestreo

Es una actividad en donde se toma un conjunto de muestras representativas que permiten caracterizar y analizar el suelo en estudio, las cuales son debidamente etiquetadas y enviadas al

laboratorio para su análisis, la cual genera como resultado un valor analítico medio de la propiedad o compuesto analizado (144).

## **a) Tipos de muestreo**

### **Muestreo de identificación**

El muestreo de identificación investiga la existencia de contaminación del suelo a través de la obtención de muestras representativas con el fin de establecer si el suelo supera o no los Estándares de Calidad Ambiental o los valores de fondo de acuerdo a lo establecido en el D. S. N.º 002-2013-MINAM. En el muestreo de identificación, no se dispone de datos precisos sobre la concentración de compuestos contaminantes en el suelo, sin embargo, para contar con un límite de confianza aceptable, es adecuado realizar un número mínimo de puntos de muestreo (144).

### **Muestreo de detalle**

Obtiene muestras representativas de suelo para determinar el área y volumen del suelo contaminado en las áreas de interés determinadas a través de la fase de identificación. El muestreo de detalle, cuantifica y delimita las zonas de afectación del suelo y las plumas de propagación en el agua subterránea, tanto en espacio y tiempo (144).

### **Muestreo de nivel de fondo**

Determina la concentración de los químicos regulados por el ECA suelo en sitios contiguos al área contaminada, los mismos que pueden encontrarse en el suelo de manera natural o que fueron generados por alguna fuente antropogénica ajena (144).

### **Muestreo de comprobación de la remediación**

Demuestra que las acciones de remediación implementadas en un suelo contaminado alcanzaron de forma estadísticamente demostrable, concentraciones menores o iguales a los valores establecidos en el ECA suelo. Los resultados serán incorporados

en el informe de culminación de acciones de remediación que será presentado a la entidad de fiscalización ambiental (144).

## **b) Técnicas de muestreo**

### **Muestras superficiales**

La toma de muestras superficiales hasta una profundidad de aproximadamente un metro se puede aplicar sondeo manual. Es un sistema relativamente fácil y de bajo costo, con muestras pequeñas, por lo que es necesario obtener muestras compuestas de varios sondeos. Grandes volúmenes de muestra requiere someterlas a partición (cuarteo), para reducirlas y obtener una muestra compuesta representativa. Para lo cual se recomienda cuartear la muestra mezclada y repetir el proceso hasta llegar a la cantidad de material necesario (144).

**Tabla 12. Profundidad del muestreo según el uso del suelo**

<b>Usos de suelo</b>	<b>Profundidad del muestreo</b>
Suelo agrícola	0 – 30 cm 30 – 60 cm
Suelo residencial / parques	0 – 10 cm 10 – 30 cm
Suelo comercial / industrial / Extractivo	0 – 10 cm

*Nota:* tomada de Guía para muestreo de suelos (144)

## **c) Manejo de muestras**

### **Materiales para guardar y transportar muestras**

Las características del recipiente deben de ser compatibles con el material del suelo y los agentes contaminantes en estudio a muestrear, deben ser resistentes a la ruptura y evitar reacciones químicas con la muestra o pérdidas por evaporación (144).

### **Etiquetado**

La etiqueta debe ser colocada en un lugar visible y no sobrepasar el tamaño del recipiente y ser adherida adecuadamente para evitar su pérdida. Esta debe contar con la siguiente información como mínimo: número o clave de identificación, lugar de muestreo, nombre del proyecto, la fecha y hora de muestreo,

nombre de la empresa así como las iniciales de la persona que toma la muestra (144).

**Tabla 13. Recipientes, temperatura de preservación y tiempo de conservación de muestras ambientales para los análisis correspondientes**

Parámetro	Tipo de recipiente	Temperatura de preservación	Tiempo máximo de conservación
Metales pesados y metaloides	Bolsa de polietileno densa	Sin restricciones	Sin restricciones

*Nota:* tomada de Guía para muestreo de suelos (144)

#### **d) Determinación de puntos**

Se deben identificar aquellas áreas que presenten una distribución similar en cuanto a la contaminación, zonas con afectación localizadas y zonas en las que se sospeche afectación no localizadas. Así el esfuerzo se debe centrar en las áreas donde haya mayor incertidumbre o mayor probabilidad de existencia de contaminantes y en la variabilidad de la distribución de la contaminación sea mayor (144).

#### **Número mínimo de puntos de muestreo**

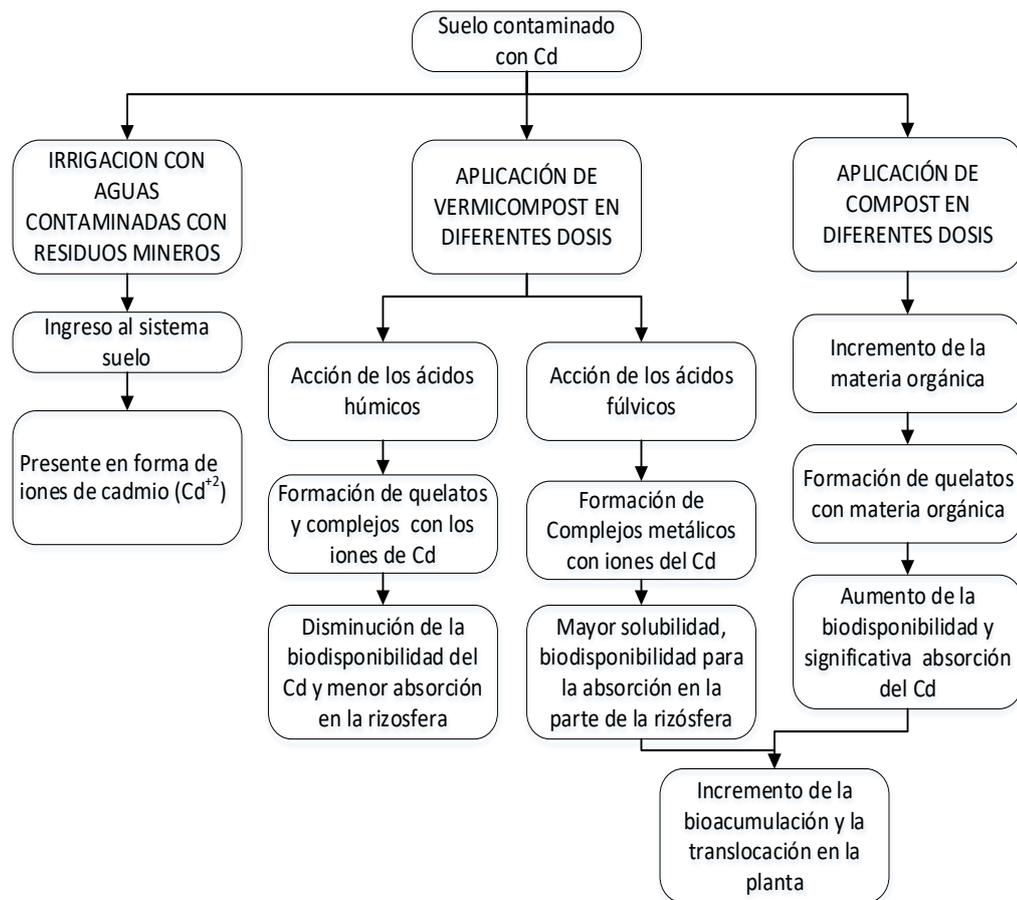
El número de puntos de muestreo se determina en función de cada área de potencial interés dentro del predio de estudio, que abarca el número total de los puntos de muestreo, tanto superficial como de profundidad.

**Tabla 14. Número mínimo de puntos de muestreo para el muestreo de identificación**

Área de potencial interés (ha)	Puntos de muestreo en total
0.1	4
0.5	6
1	9
2	15
3	19
4	21
5	23
10	30
15	33
20	36
25	38
30	40
40	42
50	44
100	50

*Nota:* tomada de Guía para muestreo de suelos (144)

## 2.4.2. Método teórico



**Figura 8. Método teórico del suelo contaminado con cadmio**

## 2.5. Definición de términos básicos

**Suelo:** “cuerpo natural, capa superficial del planeta Tierra y considerada la interface de la litósfera que se encuentra en constante transformación y permanente intercambio con la atmósfera, hidrósfera y biósfera, por ello es dinámico y está expuesto a todos los fenómenos y sucesos que ocurran en su entorno” (145).

**Contaminación del suelo:** “es un proceso o procesos que conllevan la pérdida de productividad del suelo. Es lo que sucede una vez que el suelo recibe sustancias tóxicas en concentraciones que superan su capacidad natural de autodepuración” (47).

**Contaminante del suelo:** “es una sustancia o agente presente en el suelo que tiene efectos no deseados y que afecta negativamente al suelo. Aunque la

mayoría de los contaminantes es de origen antropogénico, algunos pueden ocurrir naturalmente del suelo como componentes del suelo y pueden ser tóxicos en concentraciones altas” (35).

**Metal pesado:** “es un metal de la tabla periódica cuyo peso específico es superior a 5 g/cm<sup>3</sup> o tiene un número atómico por encima de 20, excluyendo a los metales alcalinos y elementos alcalinotérreos. En su mayoría son tóxicos en concentraciones altas” (146).

**Cadmio:** “es un metal pesado cuyo número atómico es 48, es considerado como uno de los elementos más tóxicos y se obtiene como subproducto del tratamiento metalúrgico del zinc y del plomo. Su movilidad en el medio depende de varios factores tales como el pH, el potencial redox, la cantidad de materia orgánica y la presencia de arcillas y óxidos de hierro” (147).

**Toxicidad:** “es la capacidad de sustancias químicas de producir alteraciones perjudiciales para los organismo o seres vivos” (148).

**Absorción:** “proceso por el cual una sustancia tóxica atraviesa las membranas de las células de un organismo a través de la piel, pulmones, tracto digestivo o branquias y luego es transportado hacia otros órganos” (149).

**Adsorción:** “proceso por el que el agua o cuerpos disueltos, materiales dispersos o coloides son atraídos y se concentran sobre la superficie de un sólido por enlaces físicos y químicos” (150).

**Intercambio iónico:** “es un fenómeno que se produce al poner en contacto un sólido iónico y una mezcla líquida con contenido de iones en solución. El sólido iónico presenta cationes y aniones intercambiables en su superficie externa o interna. Las arcillas y la materia orgánica del suelo son cambiadores iónicos naturales que contribuyen significativamente en los procesos de depuración de las aguas que atraviesan el suelo” (151).

**Enmienda:** “son materiales capaces de provocar cambios en ciertas propiedades o características del suelo, para así tratarlo y manipular las condiciones del suelo utilizado” (30).

**Enmienda orgánica:** “es una sustancia orgánica que son aplicadas al suelo con la finalidad de mejorar las propiedades químicas, físicas y biológicas, también ayuda a restaurar suelos degradados” (152).

**Compost:** “es un abono orgánico, obtenido a partir de la descomposición controlada de la materia orgánica. Es un producto estable, de olor agradable y con multitud de propiedades beneficiosas para los suelos y plantas; que se consigue tras la biodegradación en presencia de oxígeno de los residuos orgánicos” (153).

**Vermicompost:** “es un producto obtenido a partir de la acción conjunta de microorganismos y lombrices, constituye una enmienda orgánica biorreguladora y correctora del suelo” (154).

**Remediación del suelo:** “es el conjunto de operaciones realizadas con el objetivo de controlar, disminuir o eliminar los contaminantes presentes en el suelo, con la finalidad de reducir el impacto negativo de los contaminantes hacia los seres vivos y la integridad de ecosistemas” (155).

**Fitorremediación:** “es un conjunto de tecnologías que reducen *in situ* o *ex situ* la concentración de diversos compuestos a partir de procesos bioquímicos realizados por las plantas y microorganismos asociados a ellas” (17).

**Zea mays L:** “es uno de los cultivos básicos más importantes y extendidos en todo el mundo. Constituye una de las fuentes principales de alimento de millones de personas, sobre todo en América y Asia. Es una planta de elevado porte (60-80 cm de altura), frondosa, con un sistema radicular fibroso y un sistema caulinar con pocos macollos. Las yemas laterales en la axila de las hojas

de la parte superior de la planta formarán una inflorescencia femenina (mazorca) cubierta por hojas y que servirán como reserva” (156).

**Rizosfera:** “es una zona de interacción única y dinámica entre raíces de plantas y microorganismos del suelo. Esta región especializada, está caracterizada por el aumento de la biomasa microbiana y de su actividad” (157).

**Bioacumulación:** “es un proceso de acumulación neta de metales u otras sustancias persistentes en un organismo a partir de fuentes bióticas (otros organismos) y abióticas (suelo, aire y agua)” (158).

**Traslocación:** “es un proceso dinámico que realizan las plantas que consiste en el transporte de agua, minerales y nutrientes a una larga distancia hacia lugares donde serán almacenados” (159).

## **CAPÍTULO III**

### **METODOLOGÍA**

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

##### **3.1.1. Método general**

El método general es científico por seguir un conjunto de procedimientos por los cuales se plantean los problemas científicos y se ponen a prueba las hipótesis (160).

El trabajo investigativo inició con el planteamiento del problema donde se identificó que el suelo agrícola de Leonor Ordoñez presenta contaminación por cadmio; seguidamente se realizó el marco teórico en la cual se describen las referencias y conceptos sobre la influencia de las enmiendas orgánicas en la fitorremediación con *Zea mays L.*; el siguiente procedimiento es la formulación de la hipótesis donde se plantea que la aplicación de enmiendas orgánicas favorece la fitorremediación con *Zea mays L.* en un suelo contaminado con cadmio de Leonor Ordoñez, Jauja; se realiza el proceso de experimentación para poner a prueba la hipótesis; finalizando con la obtención de resultados y conclusiones.

##### **3.1.2. Método específico**

El método específico es inductivo experimental que va de lo particular (hipótesis específica) a lo general (hipótesis general), teniendo

la experiencia como punto de partida del conocimiento, la inducción es el razonamiento que parte de la observación de los fenómenos particulares, la realidad, se eleva a leyes o reglas científicas a través de la generalización de estas observaciones (161). Esto permite determinar y analizar el efecto de la aplicación de enmiendas orgánicas en la fitorremediación con *Zea mays L.* en un suelo contaminado con cadmio.

### **3.1.3. Tipo de investigación**

El tipo de investigación es aplicada, debido a que se utiliza la investigación teórica acerca de la disponibilidad de cadmio en el suelo, para aplicar enmiendas orgánicas que asisten a la planta (*Zea mays*) en el proceso de fitorremediación, para luego evaluar la variación de la disponibilidad de cadmio en el suelo y la concentración de cadmio en la planta.

### **3.1.4. Nivel de investigación**

El nivel de investigación es explicativo, pues el interés está en explicar el efecto de las diferentes dosis de enmiendas orgánicas, vermicompost y compost en la fitorremediación con *Zea mays L.* en un suelo agrícola contaminado con cadmio de Leonor Ordoñez. Este nivel de investigación tiene el objetivo de explicar las causas por las que sucede el fenómeno o evento, mediante las pruebas de hipótesis, los resultados y la conclusión de este tipo de investigaciones constituyen el nivel más profundo de conocimiento (162).

## **3.2. Diseño de la investigación**

### **3.2.1. Diseño cuasiexperimental**

El diseño utilizado será cuasiexperimental que viene a ser un principal instrumento de trabajo dentro de la investigación aplicada, a su vez son diseños de investigación no aleatorios, debido a esta no aleatorización, no es factible determinar con exactitud la equivalencia inicial de grupos, pero se desea tener el mejor control posible de los grupos (163).

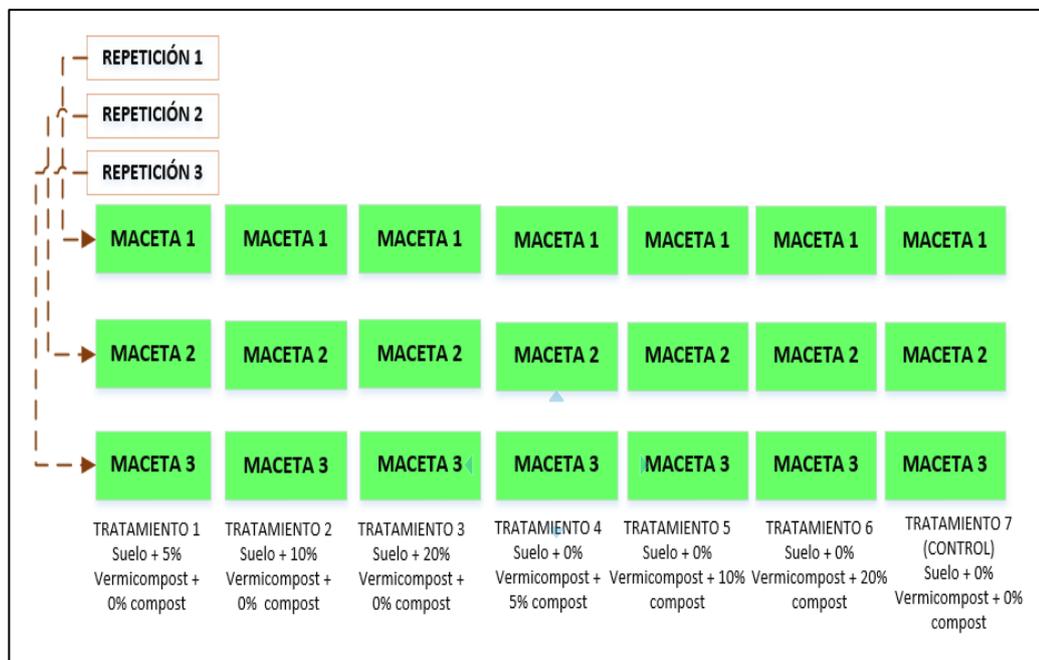
En este caso la investigación es no aleatoria, además se realiza una observación de postest de la concentración de cadmio en suelo experimental y el *Zea mays L.* También se tiene un grupo control que permite corroborar el efecto de las enmiendas orgánicas en la fitorremediación.

En la siguiente tabla, se presentan los 7 tratamientos aplicados con sus respectivas dosis de enmiendas orgánicas.

**Tabla 15. Tratamientos en estudio**

Tratamientos	Vermicompost (%)	Compost (%)
T1	05	0
T2	10	0
T3	20	0
T4	0	05
T5	0	10
T6	0	20
T7	Control	Control

A continuación, se muestra el diseño experimental que está constituido con los 7 tratamientos y sus 3 repeticiones, haciendo un total de 21 unidades experimentales.

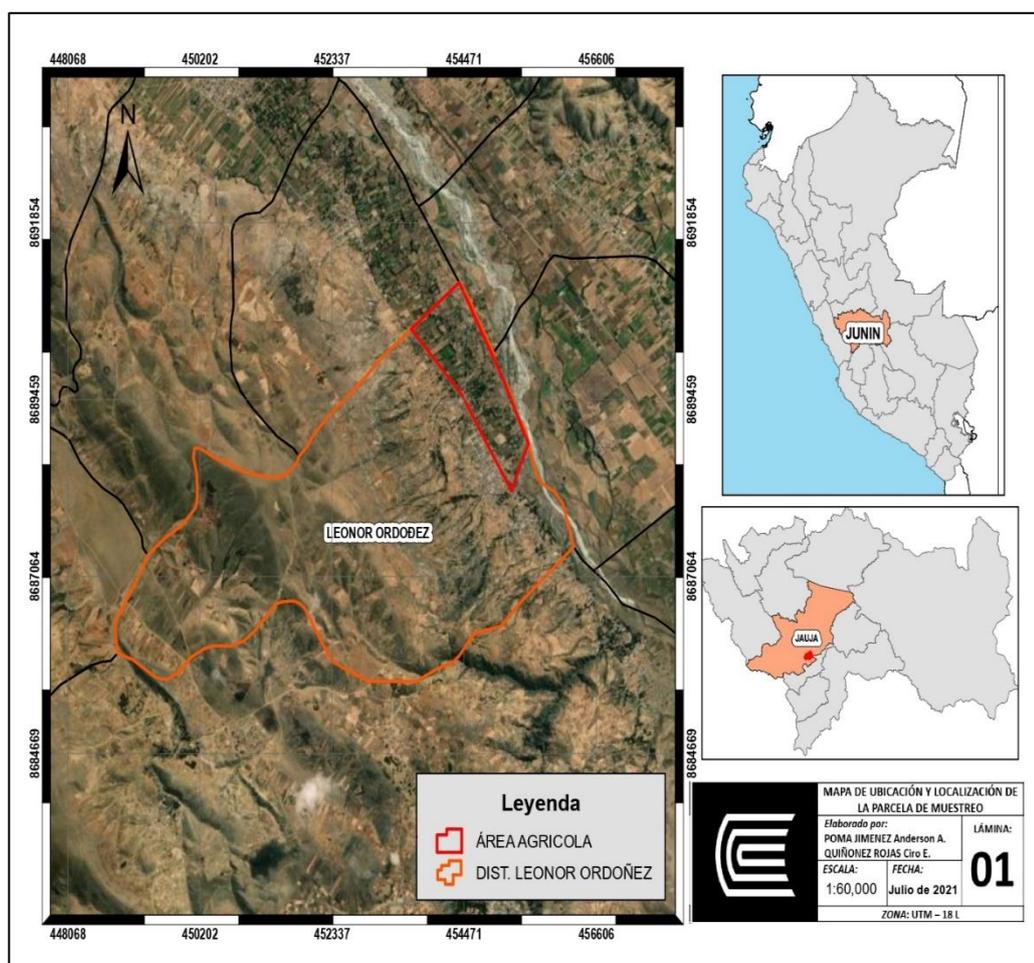


**Figura 9. Diseño completamente al azar del experimental de los 7 tratamientos en estudio**

### 3.3. Población y muestra

#### 3.3.1. Población

La población son los suelos agrícolas del distrito de Leonor Ordoñez que son regadas con aguas del río Mantaro, de la parte baja del distrito, entre la carretera central margen derecha y la orilla de río Mantaro; cuya área total aproximada es de 200 hectáreas, a una altitud de 3328 m s. n. m.



**Figura 10. Mapa de Ubicación y Localización del lugar de muestreo**

#### Muestra

La muestra fue elegida a conveniencia (no aleatoria), esta comprende un área de 3.249 hectáreas de suelos agrícolas contaminados con cadmio; el muestreo de suelos fue al azar, obteniendo un promedio de 42 kg de una muestra compuesta.

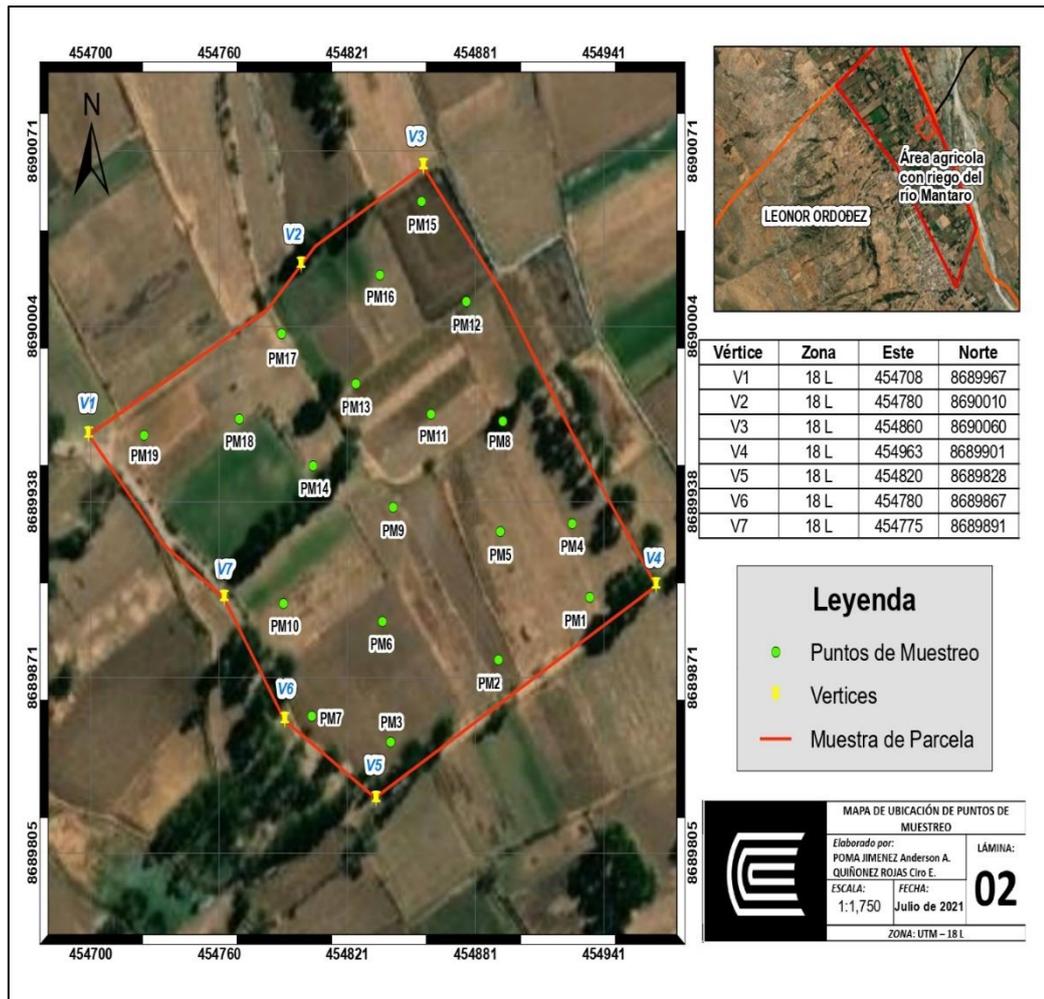


Figura 11. Puntos de la parcela de muestreo

Tabla 16. Coordenadas UTM de los vértices de la parcela de muestra

Vértice	Zona	Este	Norte
V1	18 L	454708	8689967
V2	18 L	454780	8690010
V3	18 L	454860	8690060
V4	18 L	454963	8689901
V5	18 L	454820	8689828
V6	18 L	454780	8689867
V7	18 L	454775	8689891

**Tabla 17. Coordenadas UTM de los puntos de muestreo**

Punto de muestreo	Zona	Este	Norte
PM1	18 L	454934	8689901
PM2	18 L	454891	8689877
PM3	18 L	454840	8689846
PM4	18 L	454926	8689929
PM5	18 L	454892	8689926
PM6	18 L	454837	8689892
PM7	18 L	454803	8689856
PM8	18 L	454893	8689968
PM9	18 L	454842	8689935
PM10	18 L	454790	8689899
PM11	18 L	454859	8689970
PM12	18 L	454876	8690013
PM13	18 L	454824	8689982
PM14	18 L	454804	8689951
PM15	18 L	454855	8690051
PM16	18 L	454835	8690023
PM17	18 L	454789	8690001
PM18	18 L	454769	8689969
PM19	18 L	454725	8689962

### 3.4. Materiales y equipos

#### 3.4.1. Materiales

Los materiales utilizados para el desarrollo de la experimentación vienen a ser las siguientes:

**Tabla 18. Materiales de recolección de datos**

Etapa	Equipos	Materiales
<b>Muestreo de suelo</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• GPS marca Garmin</li> <li>• Cámara digital</li> <li>• Balanza de capacidad máxima de 12 kg</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pala</li> <li>• Pico</li> <li>• Tamiz #2 mm</li> <li>• Bolsas de 20 kg</li> </ul>
<b>Análisis del cadmio en el suelo y enmiendas orgánicas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Espectrofotómetro UV-Visible METROLAB Mod. 4200</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bolsa de muestreo (1 kg)</li> <li>• Pala pequeña</li> <li>• Cinta de embalaje</li> </ul>
<b>Análisis de cadmio en el <i>Zea mays L.</i> parte radicular y foliar</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Espectrofotómetro de marca Thermo Electrón Corporation Serie SOLAAR M.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bolsa de muestreo (1 kg)</li> <li>• Cinta de embalaje</li> </ul>
<b>Aplicación del experimento</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Macetas de 5 kg</li> <li>• Papel para rótulo</li> </ul>
<b>Procesamiento de resultados de la experimentación y prueba de hipótesis</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Laptops</li> <li>• Software IBM SPSS Statistics V 25.0</li> <li>• Software de Excel, versión 2013.</li> </ul>	

### **3.5. Métodos**

#### **a) Muestreo de suelo**

El muestreo de suelos se realizó en el distrito de Leonor Ordoñez, provincia de Jauja en el mes de junio del 2021 en un área de 3.249 hectáreas. Según el protocolo de muestreo de suelos el muestreo fue aleatorio, recolectándose un total de 19 muestras simples, a una profundidad de 30 cm y con un peso promedio de 9 kg por punto de muestreo con la ayuda de una pala y un pico. Se procedió a homogenizar las muestras simples para luego realizar el cuarteo correspondiente y obtener una muestra compuesta de 42 kg de suelo para llevar a cabo la experimentación.

Por otro lado, se sacó una muestra de 1 kg, para realizar el análisis de caracterización fisicoquímico del suelo de Leonor Ordoñez, este análisis se realizó en el laboratorio de la Universidad Nacional Agraria la Molina facultad de Agronomía.

#### **b) Aplicación del experimento**

Se tamizó la muestra compuesta de Leonor Ordoñez con un tamiz de 2 mm de diámetro, luego se procedió a pesar en la balanza 2 kg de suelo por cada maceta previamente rotuladas por tratamiento.

Se adquirió el vermicompost y compost del Instituto Nacional de Investigación Agraria (INIA); se procedió a homogenizar el suelo con las enmiendas orgánicas de acuerdo a la dosis por tratamiento.

Se compró las semillas de maíz (*Zea mays*) de la variedad *San Gerónimo*, seguidamente se germinó las semillas durante 5 días, luego se procedió a sembrar las semillas germinadas del maíz. Se regó periódicamente con agua según la necesidad de las plantas. A los 15 días después de la siembra se procedió a eliminar las plantas más débiles o mal conformadas, quedando con 5 plantas por tratamiento.

Se condujo el experimento durante 60 días calendario, con los cuidados necesarios para el crecimiento de la planta, con el riego cada 4 días.

### **c) Análisis del cadmio en el suelo**

Finalizado el periodo de experimentación se procedió a homogenizar el suelo de cada maceta, para la obtención de una muestra de 500 g. La muestra fue enviada al laboratorio de la Universidad Nacional Agraria La Molina facultad de Agronomía para su análisis del contenido cadmio total en el suelo, mediante el método de espectrofotometría de adsorción atómica.

Paralelo a ello se mandó a analizar la concentración de cadmio en el vermicompost y compost.

Comparación de los resultados de la concentración de cadmio en los suelos de Leonor Ordoñez con los estándares de calidad del suelo del Perú, España, Australia y Canadá.

Procesamiento de los resultados del análisis del cadmio del suelo posexperimento mediante el software IBM SPSS Statistics V 25.0.

### **d) Análisis de cadmio en el *Zea mays L.***

Finalizado el período experimental se procedió a cortar la parte aérea de la planta de todos los tratamientos para luego colocarlo en la bolsa de muestreo debidamente rotuladas. Asimismo, se extrajeron las raíces cuidadosamente, para poder lavarlas, orearlas y empacarlas en las bolsas debidamente rotuladas.

Las muestras fueron enviadas al laboratorio de la Universidad Nacional Agraria La Molina facultad de Agronomía para su análisis del contenido cadmio total en la parte foliar y radicular, mediante el método de espectrofotometría de adsorción atómica. Cuyos resultados fueron la concentración de cadmio en la parte foliar y radicular.

Procesamiento de los resultados del análisis de cadmio en el *Zea mays L.* (la suma de las concentraciones de cadmio de la parte foliar y radicular) mediante el software IBM SPSS Statistics V 25.0.

### e) Evaluación del efecto de las enmiendas orgánicas en el factor de bioacumulación y traslocación

Teniendo como resultados la concentración de cadmio en el parte foliar y radicular del *Zea mays L.* se procedió a determinar los factores de bioacumulación y traslocación.

Factor de bioacumulación en la parte foliar y radicular.

$$FBC = \frac{\text{Concentración de EPT en parte foliar}}{\text{Concentración de EPT en el suelo}}$$

$$FBC = \frac{\text{Concentración de EPT en parte radicular}}{\text{Concentración de EPT en el suelo}}$$

Factor de traslocación en el *Zea mays L.*

$$FT = \frac{\text{Concentración de EPT en parte foliar}}{\text{Concentración de EPT en el radicular}}$$

### f) Prueba de hipótesis

Para la prueba de hipótesis de los objetivos específicos la aplicación de las siguientes pruebas.

**i. Prueba de normalidad:** tiene como finalidad analizar cuanto difiere la distribución de los datos observados respecto a lo esperado si procediesen de una distribución normal con la misma media y desviación típica. Los valores de la variable dependiente deben de seguir una distribución normal; por lo menos en la población a la que pertenece la muestra, la distribución normal o gaussiana es la distribución teórica mejor estudiada y debe su importancia fundamentalmente a la frecuencia con la que distintas variables asociadas a fenómenos naturales y cotidianos siguen, aproximadamente, esta distribución (164).

**ii. Análisis de varianza (ANVA):** el análisis de varianza de un factor sirve para comparar varios grupos en una variable cuantitativa, se aplica para contrastar

la igualdad de medias de tres o más poblaciones independientes y con distribución normal (165). Este método es fundamental en los diferentes análisis de resultado experimental, en los que interesa comparar los resultados de K tratamientos o factores con respecto a la variable dependiente (166).

**iii. Prueba de Duncan:** también denominada prueba de rango múltiples, esta prueba consiste en la comparación de las medias, donde se ajusta la diferencia crítica considerando si los dos promedios que se comparan son adyacentes o si existe una o dos medias entre las medias que se están comparando (167). Esta prueba es muy eficaz debido a su superpoder de discriminación y debe utilizarse después de determinar que exista una diferencia estadísticamente significativa mediante la aplicación del análisis de varianza (168).

**iv. Prueba de Kruskal Wallis:** este método permite comparar los valores de más de dos grupos, cuando no se cumplen los supuestos de normalidad o de homogeneidad de varianzas exigidos en el análisis de varianza completamente aleatorio (169).

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

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

##### 4.1.1. Resultado del análisis de cadmio en el *Zea mays L.*

En la tabla 19 se muestran los resultados del análisis de cadmio en el *Zea mays L.*, después de la aplicación de las enmiendas orgánicas.

**Tabla 19. Resultado del análisis de cadmio total en el *Zea mays L.***

Tratamiento	Repeticiones	Foliar	Radicular	Total
		Cd total (mg/kg)	Cd total (mg/kg)	Cd total (mg/kg)
T1 (05% VC)	I	0.49	14.26	14.75
	II	0.40	10.57	10.97
	III	0.43	9.36	9.79
T2 (10% VC)	I	0.45	10.53	10.98
	II	0.58	12.3	12.88
	III	0.66	9.97	10.63
T3 (20% VC)	I	0.60	13.31	13.91
	II	0.66	14.53	15.19
	III	0.65	11.62	12.27
T4 (05% CO)	I	0.60	6.75	7.35
	II	0.56	6.66	7.22
	III	0.84	6.29	7.13
T5 (10% CO)	I	0.66	9.36	10.02
	II	0.59	8.93	9.52
	III	0.68	7.25	7.25
T6 (20% CO)	I	0.58	8.8	9.38
	II	0.54	7.08	7.62
	III	0.61	6.45	7.06
T7 (Control)	I	0.55	6.4	6.95
	II	0.49	6.55	7.04
	III	0.55	6.29	6.84

*Nota:* tomada de Laboratorio de análisis de suelos, plantas, aguas y fertilizantes de la Universidad Nacional Agraria la Molina, Facultad de Agronomía, Lima

La concentración del cadmio en el *Zea mays L.* representa la cantidad de este elemento disponible en el suelo que la planta pudo absorber en la raíz y translocar a la parte aérea durante el proceso de fitorremediación con la aplicación de diferentes dosis de enmiendas orgánicas (vermicompost y compost).

La tabla 19 muestra que los tratamientos con vermicompost son los que tuvieron mejores resultados en la absorción del cadmio, llegando hasta un 15.19 mg/kg en el *Zea mays* con una dosis de 20% de vermicompost, lo que afirma que aplicando esta enmienda orgánica incrementa la absorción del metal por el *Zea mays L.*, esto debido a los ácidos fúlvicos del vermicompost que forman complejos organometálicos solubles con el cadmio.

#### 4.1.2. Resultado de análisis de cadmio en el suelo experimental

En la tabla 20 se muestran los resultados del análisis de cadmio en el suelo experimental, después de la aplicación de las enmiendas orgánicas.

**Tabla 20. Resultado del análisis de cadmio total del suelo experimental**

Tratamiento	Repeticiones	Cd total
		(mg/kg)
T1 (05% VC)	I	8.65
	II	9.09
	III	8.57
T2 (10% VC)	I	8.45
	II	7.94
	III	8.14
T3 (20% VC)	I	7.62
	II	8.38
	III	7.82
T4 (05% CO)	I	9.11
	II	8.58
	III	8.30
T5 (10% CO)	I	7.79
	II	8.01
	III	6.97
T6 (20% CO)	I	7.48
	II	7.17
	III	7.73
T7 (Control)	I	7.56
	II	6.97
	III	7.62

*Nota:* tomada del Laboratorio de análisis de suelos, plantas, aguas y fertilizantes de la Universidad Nacional Agraria la Molina, Facultad de Agronomía, Lima

La concentración del cadmio en el suelo experimental representa la cantidad de este elemento que no ha sido absorbido por el *Zea mays L.* en el proceso de fitorremediación con la aplicación de diferentes dosis de enmiendas orgánicas (vermicompost y compost).

La tabla 20 muestra que el cadmio total vario de 6.97 a 9.11 mg/kg, siendo el tratamiento control uno de los que tuvo mejor resultado, lo que indica que las enmiendas orgánicas no tienen un efecto en la disminución de la concentración de cadmio en el suelo, debido a que estas enmiendas van a presentar en su composición un contenido alto de cadmio, incrementando la concentración de este metal en el suelo experimental y afectando la absorción del cadmio por la planta.

#### **4.1.3. Resultado del factor de bioacumulación y traslocación en el *Zea mays L.***

##### **4.1.3.1. Factor de bioconcentración en la parte foliar del *Zea mays L.***

En la tabla 21 se muestran los resultados del factor de bioacumulación en la parte foliar del *Zea mays L.*, después de la aplicación de las enmiendas orgánicas.

**Tabla 21. Resultado del factor de bioacumulación en la parte foliar**

Tratamiento	Repeticiones	Foliar	Suelo	Factor de bioacumulación
		Cd total (mg/kg)	Cd total (mg/kg)	
T1 (05% VC)	I	0.49	10.72	0.045
	II	0.40		0.037
	III	0.43		0.040
T2 (10% VC)	I	0.45		0.042
	II	0.58		0.054
	III	0.66		0.062
T3 (20% VC)	I	0.60		0.056
	II	0.66	0.062	
	III	0.65	0.061	
T4 (05% CO)	I	0.60	0.056	
	II	0.56	0.052	
	III	0.84	0.078	
T5 (10% CO)	I	0.66	0.062	
	II	0.59	0.055	
	III	0.68	0.063	
T6 (20% CO)	I	0.58	0.054	
	II	0.54	0.050	
	III	0.61	0.057	
T7 (Control)	I	0.55	0.051	
	II	0.49	0.045	
	III	0.55	0.051	

*Nota:* tomada del Laboratorio de análisis de suelos, plantas, aguas y fertilizantes de la Universidad Nacional Agraria la Molina, Facultad de Agronomía, Lima

El factor de bioacumulación del cadmio en la parte foliar del *Zea mays L.* representa la cantidad de este elemento disponible en el suelo que la planta pudo bioacumular a la parte aérea durante el proceso de fitorremediación con la aplicación de diferentes dosis de enmiendas orgánicas (vermicompost y compost).

La tabla 21 muestra que en los 7 tratamientos el factor de bioacumulación es muy bajo, lo que afirma que las enmiendas orgánicas no influyen en la bioacumulación del cadmio en la parte aérea del *Zea mays L.*, esto se debe a que esta planta tiene como característica que no bioacumula metales en la parte foliar, ya que el *Zea mays L.* para realizar el proceso de fitorremediación utiliza el mecanismo de fitoestabilización.

#### 4.1.3.2. Factor de bioconcentración en la parte radicular del *Zea mays L.*

En la tabla 22 se muestran los resultados del factor de bioacumulación en la parte radicular del *Zea mays L.*, después de la aplicación de las enmiendas orgánicas.

**Tabla 22. Resultado del factor de bioacumulación en la parte radicular**

Tratamiento	Repeticiones	Radicular	Suelo	Factor de bioacumulación
		Cd total (mg/kg)	Cd total (mg/kg)	
T1 (05% VC)	I	14.26	10.72	1.330
	II	10.57		0.986
	III	9.36		0.873
T2 (10% VC)	I	10.53		0.982
	II	12.3		1.147
	III	9.97		0.930
T3 (20% VC)	I	13.31		1.242
	II	14.53		1.355
	III	11.62		1.084
T4 (05% CO)	I	6.75		0.630
	II	6.66	0.621	
	III	6.29	0.587	
T5 (10% CO)	I	9.36	0.873	
	II	8.93	0.833	
	III	7.25	0.676	
T6 (20% CO)	I	8.8	0.821	
	II	7.08	0.660	
	III	6.45	0.602	
T7 (Control)	I	6.4	0.597	
	II	6.55	0.611	
	III	6.29	0.587	

*Nota:* tomada del Laboratorio de análisis de suelos, plantas, aguas y fertilizantes de la Universidad Nacional Agraria la Molina, Facultad de Agronomía, Lima

La tabla 22 muestra que los tratamientos con vermicompost son los que tuvieron mejores resultados en la bioacumulación del cadmio, llegando hasta un 1.355, lo que afirma que aplicando esta enmienda orgánica favorece el incremento del factor de bioacumulación en la parte radicular del *Zea mays L.*, esto debido a que el vermicompost genera productos de descomposición solubles, y la materia orgánica soluble puede incrementar la solubilidad al formar complejos órgano metales solubles y esto facilita la absorción del metal por la planta, principalmente en la raíz porque constituye el tejido de entrada principal de metales

pesados. Por otro lado, estos resultados se deberían a que el *Zea mays L.*, viene a ser una planta fitoestabilizadora.

#### 4.1.3.3. Factor de traslocación

En la tabla 23 se muestran los resultados del factor de traslocación, después de la aplicación de las enmiendas orgánicas.

**Tabla 23. Resultado del factor de traslocación**

Tratamiento	Repeticiones	Foliar	Radicular	Factor de traslocación
		Cd total (mg/kg)	Cd total (mg/kg)	
T1 (05% VC)	I	0.49	14.26	0.034
	II	0.40	10.57	0.038
	III	0.43	9.36	0.045
T2 (10% VC)	I	0.45	10.53	0.043
	II	0.58	12.3	0.047
	III	0.66	9.97	0.066
T3 (20% VC)	I	0.60	13.31	0.045
	II	0.66	14.53	0.046
	III	0.65	11.62	0.056
T4 (05% CO)	I	0.60	6.75	0.089
	II	0.56	6.66	0.084
	III	0.84	6.29	0.133
T5 (10% CO)	I	0.66	9.36	0.071
	II	0.59	8.93	0.066
	III	0.68	7.25	0.093
T6 (20% CO)	I	0.58	8.8	0.065
	II	0.54	7.08	0.076
	III	0.61	6.45	0.095
T7 (Control)	I	0.55	6.4	0.086
	II	0.49	6.55	0.074
	III	0.55	6.29	0.087

*Nota:* tomada del Laboratorio de análisis de suelos, plantas, aguas y fertilizantes de la Universidad Nacional Agraria la Molina, Facultad de Agronomía, Lima

La tabla 23 muestra que en los tratamientos con compost a una dosis de 5%, 10% y 20% son los que presentan un incremento en el factor de traslocación en el *Zea mays L.*, pero este incremento es mínimo, ya que el factor de traslocación sigue siendo muy bajo; esto se debe a que esta planta tiene como característica que no trasloca metales en la parte foliar, ya que el *Zea mays L.* para realizar el proceso de fitorremediación utiliza el mismo mecanismo de fitoestabilización.

#### 4.1.4. Resultado del análisis del suelo agrícola de Leonor Ordoñez

##### 4.1.4.1. Características fisicoquímicas del suelo

En la tabla 24 se muestran los resultados de la caracterización fisicoquímica del suelo de Leonor Ordoñez.

**Tabla 24. Resultado de análisis fisicoquímicos del suelo experimental - Leonor Ordoñez, Jauja-2021**

Parámetros	Resultado
Textura:	
Arena (%)	40
Limo (%)	35
Arcilla (%)	25
Clase textural	Franco
Carbonato de calcio (%)	15.74
Conductividad eléctrica (dS/m)	0.3
pH (1:1)	7.53
Materia orgánica (%)	2.43
Fosforo disponible (mg/kg)	22.8
Potasio disponible (mg/kg)	141
Cationes cambiabiles:	
Calcio (meq/100g)	10.35
Magnesio (meq/100g)	4
Sodio (meq/100g)	0.1
Potasio (meq/100g)	0.59
Capacidad de intercambio catiónico efectiva (meq/100g)	15.04

*Nota:* tomada del Laboratorio de análisis de suelos, plantas, aguas y fertilizantes de la Universidad Nacional Agraria la Molina, Facultad de Agronomía, Lima

El suelo agrícola de Leonor Ordoñez presenta una textura conformada por la fracción de arena (40%), limo (35%), arcilla (25%), y es de clase textural franco donde predomina la fracción arena; el carbonato de calcio está comprendido en un 15.74%, la cual es un contenido muy alto; la conductividad eléctrica se encuentra en 0.3 dS/m, lo cual indica que no hay exceso de sales; el pH es ligeramente alcalino con un 7.53; la materia orgánica en el suelo es 2.43% la cual significa que hay un alto contenido de materia orgánica; tiene un alto contenido de fósforo disponible con 22.8 mg/kg y contenido medio de potasio disponible de 141 mg/kg; la capacidad de intercambio catiónico efectiva es 15.04 meq/100g, que viene a ser moderadamente alta; los cationes cambiabiles que se encuentran son el calcio con un 10.35 meq/100g, magnesio con 4 meq/100g, sodio con 0.1 meq/100g y potasio con 0.59 meq/100g

y finalmente la saturación de bases es de 100%, la cual es alta. En base a los parámetros evaluados este suelo presenta una fertilidad media, por la buena presencia de potasio y fósforo además una media presencia de materia orgánica. Estos datos han sido interpretados mediante la guía de interpretación de análisis de suelo que se presenta en el anexo 1.

#### 4.1.4.2. Cadmio en el suelo

En la tabla 25 se muestran los resultados de la concentración de cadmio inicial en el suelo de Leonor Ordoñez.

**Tabla 25. Resultado de análisis de cadmio total en el suelo agrícola-Leonor Ordoñez**

Parámetro	Resultado
Cadmio Total (mg/kg)	10.72

*Nota:* tomada del Laboratorio de análisis de suelos, plantas, aguas y fertilizantes de la Universidad Nacional Agraria la Molina, Facultad de Agronomía, Lima

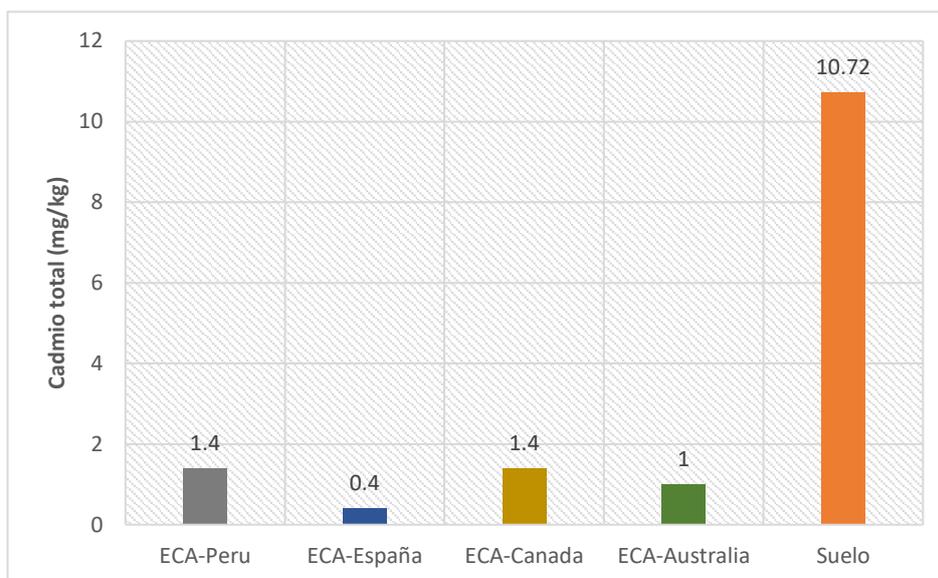
**Tabla 26. Estándares de calidad ambiental de suelos agrícolas**

Parámetro	Unidad	ECA-Perú	ECA-España	ECA-Canadá	ECA-Australia
Cd	mg/kg	1.4	0.6	1.4	1

*Nota:* tomada del Metales pesados en un suelo afectado con aceite proveniente de motores de combustión interna (170)

El análisis del contenido de cadmio total en el suelo agrícola fue de 10.72 mg/kg, superando el estándar de calidad ambiental (ECA) del suelo de Perú, que es 1.4 mg/kg, a la vez supera el ECA de España (0.4 mg/kg), Canadá (1.4 mg/kg) y la de Australia (1 mg/kg); la concentración de cadmio es alta con respecto al ECA del Perú la cual supera en 7.6 veces, al ECA de España en 26.8 veces, al ECA de Canadá en 7.6 veces y al ECA de Australia en 10.72 veces (170).

El alto contenido de cadmio en el suelo agrícola no solo se debe a la utilización de las aguas del río Mantaro para el riego, sino también al uso de agroquímicos en los cultivos, los cuales aportan cadmio al suelo.



**Figura 12. Resultado de análisis de cadmio total en el suelo agrícola-Leonor Ordoñez. Tomada del Laboratorio de análisis de suelos, plantas, aguas y fertilizantes de la Universidad Nacional Agraria la Molina, Facultad de Agronomía, Lima**

#### 4.1.5. Resultado de análisis de cadmio en las enmiendas orgánicas

##### 4.1.5.1. Concentración de cadmio en el vermicompost

En la tabla 27 se muestran los resultados del análisis de cadmio en el vermicompost.

**Tabla 27. Resultado de análisis de cadmio total en el vermicompost**

Parámetro	Resultado
Cadmio total (mg/kg)	9.52

*Nota:* tomada del Laboratorio de análisis de suelos, plantas, aguas y fertilizantes de la Universidad Nacional Agraria la Molina, Facultad de Agronomía, Lima

Según la tabla 27, el contenido de cadmio en el vermicompost es alto ( $Cd = 9,52 \text{ mg/kg}$ ), de esta forma esta enmienda orgánica no es apta para su uso en las actividades de agricultura según el anexo 2, pero fue utilizado en el proceso de experimentación debido a que se encontraba disponible en la zona; este contenido de cadmio va a aumentar la concentración de cadmio en el suelo agrícola de Leonor Ordoñez.

#### 4.1.5.2. Concentración de cadmio en el compost

En la tabla 28 se muestran los resultados del análisis de cadmio en el compost.

**Tabla 28. Resultado de análisis de cadmio total en el compost**

Parámetro	Resultado
Cadmio total (mg/kg)	8.23

*Nota:* tomada del Laboratorio de análisis de suelos, plantas, aguas y fertilizantes de la Universidad Nacional Agraria la Molina, Facultad de Agronomía, Lima

Según la tabla 28, el contenido de cadmio en el compost es alto (Cd = 8,23 mg/kg), de esta forma esta enmienda orgánica no es apta para su uso en las actividades de agricultura según el anexo 2, pero fue utilizado en el proceso de experimentación debido a que se encontraba disponible en la zona; este contenido de cadmio va a aumentar la concentración de cadmio en el suelo agrícola de Leonor Ordoñez.

## 4.2. Prueba de hipótesis

### 4.2.1. Enmiendas orgánicas en la concentración de cadmio en el maíz

En el presente estudio de investigación se planteó la hipótesis que “el compost y vermicompost influye significativamente en la concentración de cadmio total en *Zea mays L.*”

Para poder comprobar la hipótesis planteada, primero se realizó la prueba de normalidad, seguido se realizó el análisis de varianza con su respectiva significancia bilateral y finalmente la prueba de comparación múltiple de Duncan, con un nivel de significancia de 5% ( $\alpha=0.05$ ).

#### a) Prueba de normalidad

Siendo el número de datos menor a 50, se aplicó la prueba de Shapiro-Wilk, para verificar si los datos siguen una distribución normal.

**Tabla 29. Prueba de normalidad de para tratamientos. Concentración de Cd en el Zea mays L.**

	Tratamientos	Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.
<b>Concentración de Cd en mg/kg</b>	TC (Control)	,997	3	,890
	T1 (05% VC)	,916	3	,439
	T2 (10% VC)	,863	3	,277
	T3 (20% VC)	,995	3	,864
	T4 (05% CO)	,989	3	,800
	T5 (10% CO)	,880	3	,325
	T6 (20% CO)	,918	3	,446

Según la tabla 29 se puede observar que los 7 tratamientos presentan un sig. (P valor) mayor a  $\alpha=0.05$ , por lo tanto, se asume que los datos tienen una distribución normal; por ende, se procede a realizar el análisis de varianza.

### **b) Prueba de análisis de varianza**

#### **Hipótesis estadística**

$H_0 = \mu_{T1} = \mu_{T2} = \mu_{T3} = \mu_{T4} = \mu_{T5} = \mu_{T6} = \mu_{TC}$ . (La concentración de Cd en el *Zea mays L.* es igual entre los 7 tratamientos).

$H_1 =$  por lo menos algún  $\mu_{Tn}$  es diferente a los demás. (La concentración de Cd en el *Zea mays L.* no es igual entre los 7 tratamientos).

**Tabla 30. Análisis de varianza para tratamientos. Concentración de Cd en el Zea mays L.**

	Concentración de Cd en mg/kg				
	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
<b>Tratamientos</b>	123,826	6	20,638	11,112	,000
<b>Error experimental</b>	26,002	14	1,857		
<b>Total</b>	149,827	20			

Según la tabla 30 se obtiene un Sig. Igual a 0.000 la cual es menor a  $\alpha=0.05$ , por lo que la decisión probabilística que se tiene es que se rechaza la hipótesis nula ( $H_0$ ), y se acepta la hipótesis alterna ( $H_1$ ) la cual indica que al menos un tratamiento es diferente a los demás, por lo que se realizó una prueba de Duncan.

### c) Prueba de Duncan

#### Hipótesis estadística

$H_0$  = la concentración de Cd total en el *Zea mays L.* para cada uno de los tratamientos, es igual a la media de Cd total de todos los tratamientos.

$H_1$  = la concentración de Cd total en el *Zea mays L.* para cada uno de los tratamientos, no es igual a la media de Cd total de todos los tratamientos.

**Tabla 31. Prueba de comparación múltiple de Duncan para tratamientos. Concentración de Cd en el *Zea mays L.***

Orden de mérito	Tratamiento	Promedio (mg/kg)	Significación
1	T3 (20% VC)	13.7900	a
2	T1 (05% VC)	11.8367	a
3	T2 (10% VC)	11.4967	a
4	T5 (10% CO)	8.9300	b
5	T6 (20% CO)	8.0200	b
6	T4 (05% CO)	7.2333	b
7	T7 (control)	6.9433	b

Los tratamientos T3, T1 y T2 tuvieron la mayor concentración de Cd y fueron superiores estadísticamente a los demás tratamientos, sin diferencias entre sí, demostrando el efecto del VC en la absorción de Cd por *Zea mays L.* Estos resultados validan la hipótesis alterna (H1), que afirma que la concentración de cadmio total en el *Zea mays L.* para cada uno de los tratamientos es diferente a la media de cadmio total de todos los tratamientos. Los datos se presentan en la tabla 31.

Por consiguiente, se concluye que con los resultados obtenidos se ha validado la hipótesis específica de investigación planteada: El compost y vermicompost influye significativamente en la concentración de cadmio total en *Zea mays L.*

#### 4.2.2. Enmiendas orgánicas en la concentración de cadmio en el suelo

En el presente estudio de investigación se planteó la hipótesis que “el compost y el vermicompost influyen significativamente en la concentración de cadmio total en el suelo”.

Para poder comprobar la hipótesis planteada, primero se realizó la prueba de normalidad, seguido se realizó el análisis de varianza con su respectiva significancia bilateral y finalmente la prueba de comparación múltiple de Duncan, con un nivel de significancia de 5% ( $\alpha=0.05$ ).

##### a) Prueba de normalidad

Siendo el número de datos menor a 50, se aplicó la prueba de Shapiro-Wilk, para verificar si los datos siguen una distribución normal.

**Tabla 32. Prueba de normalidad para tratamientos. Concentración de Cd en el suelo**

	Tratamientos	Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.
Concentración de Cd en mg/kg	TC (Control)	,819	3	,160
	T1 (05% VC)	,862	3	,274
	T2 (10% VC)	,985	3	,763
	T3 (20% VC)	,930	3	,490
	T4 (05% CO)	,969	3	,663
	T5 (10% CO)	,900	3	,386
	T6 (20% CO)	,996	3	,882

Según la tabla 32 se puede observar que los 7 tratamientos presentan un sig. (P valor) mayor a  $\alpha=0.05$ , por lo tanto, se asume de los datos que tienen una distribución normal; por ende, se procede a realizar el análisis de varianza.

##### b) Prueba de análisis de varianza

###### Hipótesis estadística

$H_0 = \mu_{T1} = \mu_{T2} = \mu_{T3} = \mu_{T4} = \mu_{T5} = \mu_{T6} = \mu_{TC}$ . (La concentración de Cd en el suelo es igual entre los 7 tratamientos).

$H_1 =$  por lo menos algún  $\mu_{Tn}$  es diferente a los demás. (La concentración de Cd en el suelo no es igual entre los 7 tratamientos).

**Tabla 33. Análisis de varianza para tratamientos. Concentración de Cd en el suelo**

Concentración de Cd en mg/kg					
	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Tratamientos	5,723	6	,954	6,834	,002
Error experimental	1,954	14	,140		
Total	7,677	20			

Según la tabla 33 se obtiene un Sig. igual a 0.002 la cual es menor a  $\alpha=0.05$ , por lo que la decisión probabilística que se tiene es que se rechaza la hipótesis nula ( $H_0$ ), y se acepta la hipótesis alterna ( $H_1$ ) la cual indica que al menos un tratamiento es diferente a los demás, por lo que se realizó una prueba de Duncan.

### c) Prueba de Duncan

#### Hipótesis estadística

$H_0 =$  la concentración de Cd total en el suelo para cada uno de los tratamientos es igual a la media de Cd total de todos los tratamientos.

$H_1 =$  la concentración de Cd total en el suelo para cada uno de los tratamientos no es igual a la media de Cd total de todos los tratamientos.

**Tabla 34. Prueba de comparación múltiple de Duncan para tratamientos. Concentración de Cd en el suelo**

Orden de mérito	Tratamiento	Promedio (mg/kg)	Significación
1	T7 (control)	7.3833	a
2	T6 (20% CO)	7.4600	a
3	T5 (10% CO)	7.5900	a
4	T3 (20% VC)	7.9400	a
5	T2 (10% VC)	8.1767	b
6	T4 (05% CO)	8.6633	b
7	T1 (05% VC)	8.7700	b

Los tratamientos T7, T6, T5 y T3 tuvieron la menor concentración de Cd en el suelo y fueron inferiores estadísticamente a los demás tratamientos, sin diferencias entre sí, demostrando el efecto del VC y CO en la concentración de Cd en el suelo. Estos resultados validan la

hipótesis alterna (H1), que afirma que la concentración de cadmio total en el suelo para cada uno de los tratamientos es diferente a la media de cadmio total de todos los tratamientos. Los datos se presentan en la tabla 34.

Por consiguiente, se concluye que con los resultados obtenidos se ha validado la hipótesis específica de investigación planteada: el compost y vermicompost influye significativamente en la concentración de cadmio total en el suelo.

#### 4.2.3. Enmiendas orgánicas en el factor de bioacumulación y traslocación

En el presente estudio de investigación se planteó la hipótesis que “el compost y el vermicompost influyen en el factor de bioacumulación y traslocación del Cd para *Zea mays L*”.

Para poder comprobar la hipótesis planteada, primero se realizó la prueba de normalidad, seguido se realizó el análisis de varianza con su respectiva significancia bilateral y finalmente la prueba de comparación múltiple de Duncan, con un nivel de significancia de 5% ( $\alpha=0.05$ ).

#### Factor de bioconcentración en la parte aérea

##### a) Prueba de normalidad

Siendo el número de datos menor a 50, se aplicó la prueba de Shapiro-Wilk, para verificar si los datos siguen una distribución normal.

**Tabla 35. Prueba de normalidad para tratamientos. Factor de bioconcentración en la parte aérea del *Zea mays L*.**

	Tratamientos	Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.
Factor de bioconcentración de Cd en la parte aérea	TC (Control)	,750	3	,000
	T1 (05% VC)	,980	3	,726
	T2 (10% VC)	,987	3	,780
	T3 (20% VC)	,871	3	,298
	T4 (05% CO)	,862	3	,274
	T5 (10% CO)	,842	3	,220
	T6 (20% CO)	,993	3	,843

Según la tabla 35 se puede observar que 6 tratamientos presentan un sig. (P valor) mayor a  $\alpha=0.05$ , y un tratamiento (TC) presenta un Sig. (P valor) menor a  $\alpha=0.05$ , por lo tanto, se asume de los datos que no tienen una distribución normal; por ende, se procede a realizar la prueba de Kruskal Wallis.

## b) Prueba de Kruskal Wallis

### Hipótesis estadística

$H_0 = \mu_{T1} = \mu_{T2} = \mu_{T3} = \mu_{T4} = \mu_{T5} = \mu_{T6} = \mu_{TC}$ . (El factor de bioconcentración de Cd en la parte aérea es igual entre los 7 tratamientos).

$H_1 =$  por lo menos algún  $\mu_{Tn}$  es diferente a los demás. (El factor de bioconcentración de Cd en la parte aérea no es igual entre los 7 tratamientos).

**Tabla 36. Prueba de Kruskal Wallis para tratamientos. Factor de bioconcentración en la parte aérea del *Zea mays L.***

Estadísticos de prueba	
Factor de bioconcentración de Cd en la parte aérea	
H de Kruskal-Wallis	12,589
gl	6
Sig. asintótica	,050

Según la tabla 36 se obtiene un Sig. Igual a 0.050 la cual es igual a  $\alpha=0.05$ , por lo que la decisión probabilística que se tiene es que se acepta la hipótesis nula ( $H_0$ ), y se rechaza la hipótesis alterna ( $H_1$ ), por ende, se asume que el factor bioconcentración de Cd en la parte aérea del *Zea mays L.* es significativamente igual en los 7 tratamientos.

Este resultado; afirma que la aplicación de enmiendas orgánicas (vermicompost y compost) no influye significativamente en el factor bioconcentración de Cd en la parte aérea del *Zea mays L.*

## Factor de bioconcentración en la parte radicular

### a) Prueba de normalidad

Siendo el número de datos menor a 50 se aplicó la prueba de Shapiro-Wilk, para verificar si los datos siguen una distribución normal.

**Tabla 37. Prueba de normalidad para tratamientos. Factor de bioconcentración en la parte radicular del Zea mays L.**

	Tratamientos	Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.
Factor de bioconcentración de Cd en la parte radicular	TC (Control)	,991	3	,817
	T1 (05% VC)	,922	3	,458
	T2 (10% VC)	,917	3	,442
	T3 (20% VC)	,991	3	,817
	T4 (05% CO)	,899	3	,381
	T5 (10% CO)	,895	3	,369
	T6 (20% CO)	,931	3	,494

Según la tabla 37 se puede observar que los 7 tratamientos presentan un sig. (P valor) mayor a  $\alpha=0.05$ , por lo tanto, se asume de los datos que tienen una distribución normal; por ende, se procede a realizar el análisis de varianza.

### b) Prueba de análisis de varianza

#### Hipótesis estadística

$H_0 = \mu_{T1} = \mu_{T2} = \mu_{T3} = \mu_{T4} = \mu_{T5} = \mu_{T6} = \mu_{TC}$ . (El factor de bioconcentración de Cd en la parte radicular es igual entre los 7 tratamientos).

$H_1 =$  por lo menos algún  $\mu_{Tn}$  es diferente a los demás. (El factor de bioconcentración de Cd en la parte radicular no es igual entre los 7 tratamientos).

**Tabla 38. Análisis de varianza para tratamientos. Factor de bioconcentración de Cd en la parte radicular del Zea mays L.**

Factor de bioconcentración de Cd en la parte radicular					
	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Tratamientos	1,088	6	,181	11,298	,000
Error experimental	,225	14	,016		
Total	1,313	20			

Según la tabla 38 se obtiene un Sig. Igual a 0.000 la cual es menor a  $\alpha=0.05$ , por lo que la decisión probabilística que se tiene es que se rechaza la hipótesis nula ( $H_0$ ), y se acepta la hipótesis alterna ( $H_1$ ) la cual indica que al menos un tratamiento es diferente a los demás, por lo que se realizó una prueba de Duncan.

### c) Prueba de Duncan

#### Hipótesis estadística

$H_0$  = el factor de bioconcentración de Cd en la parte radicular del *Zea mays L.* para cada uno de los tratamientos, es igual a la media del factor de bioconcentración de Cd de todos los tratamientos.

$H_1$  = el factor de bioconcentración de Cd en la parte radicular para cada uno de los tratamientos, no es igual a la media del factor de bioconcentración de Cd de todos los tratamientos.

**Tabla 39. Prueba de comparación múltiple de Duncan para tratamientos. Factor de bioconcentración de Cd en la parte radicular del *Zea mays L.***

Orden de mérito	Tratamiento	Promedio (mg/kg)	Significación
1	T3 (20% VC)	1.22700	a
2	T1 (05% VC)	1.06300	a
3	T2 (10% VC)	1.01967	a
4	T5 (10% CO)	0.79400	b
5	T6 (20% CO)	0.69433	b
6	T4 (05% CO)	0.61267	b
7	T7 (control)	0.59833	b

Los tratamientos T3, T1 y T2 presentaron un mayor factor de bioconcentración de Cd en la parte radicular del *Zea mays L.* y fueron superiores estadísticamente a los demás tratamientos, sin diferencias entre sí, demostrando el efecto del VC en la absorción de Cd en la parte radicular del *Zea mays L.* Estos resultados validan la hipótesis alterna ( $H_1$ ), que afirma que el factor de bioconcentración de Cd en la parte radicular del *Zea mays L.* para cada uno de los tratamientos es diferente a la media del factor de bioconcentración de Cd de todos los tratamientos. Los datos se presentan en la tabla 39.

Este resultado afirma que la aplicación de enmiendas orgánicas (vermicompost y compost) influye significativamente en el factor de bioconcentración de Cd en la parte radicular del *Zea mays L.*

### Factor de traslocación

#### a) Prueba de normalidad

Siendo el número de datos menor a 50 se aplicó la prueba de Shapiro-Wilk, para verificar si los datos siguen una distribución normal.

**Tabla 40. Prueba de normalidad para tratamientos. Factor de traslocación en el *Zea mays L.***

	Tratamientos	Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.
Factor de traslocación de Cd	TC (Control)	,807	3	,132
	T1 (05% VC)	,976	3	,702
	T2 (10% VC)	,876	3	,312
	T3 (20% VC)	,818	3	,157
	T4 (05% CO)	,826	3	,177
	T5 (10% CO)	,883	3	,334
	T6 (20% CO)	,977	3	,708

Según la tabla 40 se puede observar que los 7 tratamientos presentan un sig. (P valor) mayor a  $\alpha=0.05$ , por lo tanto, se asume de los datos que tienen una distribución normal; por ende, se procede a realizar el análisis de varianza.

#### b) Prueba de análisis de varianza

##### Hipótesis estadística

$H_0 = \mu_{T1} = \mu_{T2} = \mu_{T3} = \mu_{T4} = \mu_{T5} = \mu_{T6} = \mu_{TC}$ . (El factor de traslocación de Cd es igual entre los 7 tratamientos).

$H_1 =$  por lo menos algún  $\mu_{Tn}$  es diferente a los demás. (El factor de traslocación de Cd no es igual entre los 7 tratamientos).

**Tabla 41. Análisis de varianza para tratamientos. Factor de traslocación de Cd en el *Zea mays L.***

	Factor de traslocación de Cd				
	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Tratamientos	,009	6	,002	7,333	,001
Error experimental	,003	14	,000		
Total	,012	20			

Según la tabla 41 se obtiene un Sig. Igual a 0.001 la cual es menor a  $\alpha=0.05$ , por lo que la decisión probabilística que se tiene es que se rechaza la hipótesis nula ( $H_0$ ), y se acepta la hipótesis alterna ( $H_1$ ) la cual indica que al menos un tratamiento es diferente a los demás, por lo que se realizó una prueba de Duncan.

### c) Prueba de Duncan

#### Hipótesis estadística

$H_0$  = el factor de traslocación de Cd en el *Zea mays L.* para cada uno de los tratamientos, es igual a la media del factor de traslocación de Cd de todos los tratamientos.

$H_1$  = el factor de traslocación de Cd en el *Zea mays L.* para cada uno de los tratamientos, no es igual a la media del factor de traslocación de Cd de todos los tratamientos.

**Tabla 42. Prueba de comparación múltiple de Duncan para tratamientos. Factor de traslocación de Cd en el *Zea mays L.***

Orden de mérito	Tratamiento	Promedio (mg/kg)	Significación
1	T4 (05% CO)	0.10200	a
2	T7 (control)	0.08233	a
3	T6 (20% CO)	0.07867	a
4	T5 (10% CO)	0.07667	a
5	T2 (10% VC)	0.05200	b
6	T3 (20% VC)	0.04900	b
7	T1 (05% VC)	0.03900	b

Los tratamientos T4, T7, T6 y T5 presentaron un mayor factor de traslocación de Cd en el *Zea mays L.* y fueron superiores estadísticamente a los demás tratamientos, sin diferencias entre sí, demostrando el efecto del CO en la traslocación del Cd de la parte radicular hacia la parte aérea del *Zea mays L.* Estos resultados validan la hipótesis alterna ( $H_1$ ), que afirma que el factor de traslocación de Cd en el *Zea mays L.* para cada uno de los tratamientos es diferente a la media del factor de traslocación de Cd de todos los tratamientos. Los datos se presentan en la tabla 42.

Este resultado afirma que la aplicación de enmiendas orgánicas (vermicompost y compost) influye significativamente en el factor de traslocación de Cd en el *Zea mays L.*

Finalmente, se concluye que con los resultados obtenidos se ha validado la hipótesis específica de investigación planteada: el compost y el vermicompost influyen en el factor de bioacumulación y traslocación del Cd para *Zea mays L.*, pero cabe resaltar que las enmiendas orgánicas no influyen significativamente en el factor bioconcentración en la parte aérea, la cual forma parte del factor de bioacumulación del *Zea mays L.*

#### **4.3. Discusión de resultados**

##### **4.3.1. Enmiendas orgánicas y la concentración de cadmio en el *Zea mays L.***

Según la comparación múltiple de Duncan, presentado en la tabla 31, muestra que los tratamientos con vermicompost a diferentes dosis tuvieron mayor concentración de cadmio, demostrando el efecto de esta enmienda orgánica en la absorción de cadmio por *Zea mays L.* El efecto del vermicompost se debe al alto contenido de materia orgánica que contiene, ya que esta realiza una serie de reacciones fisicoquímicas que forman complejos con los metales denominados compuestos organometálicos (64). La fracción de MO que se encuentra soluble puede acomplejar al cadmio, generando que se facilite la movilidad del elemento en el suelo, también esta MO al mineralizarse ocasiona que el cadmio pueda encontrarse más disponible para las plantas (72).

Las fracciones orgánicas complejas del vermicompost, incluye sustancias sintetizadas y subproductos de microorganismos, como las sustancias húmicas (126). Las sustancias húmicas están constituidas por ácidos húmicos y ácidos fúlvicos, este último se caracteriza por ser compuestos de bajo potencial de mineralización (PM) que pueden formar complejos organometálicos solubles con los contaminantes, con un peso molecular bajo, aumentando la solubilidad, disponibilidad y dispersión del cadmio (123). Por el tamaño minúsculo que presentan las moléculas de

los ácidos fúlvicos, estas pueden ingresar rápidamente a las raíces de plantas, tallos y hojas, y mientras ingresan llevan elementos traza (135). Además, por el alto contenido de ácidos fúlvicos favorecen la asimilación de los nutrientes minerales de las plantas (128).

Por otro lado, la capacidad de quelación y complejación en el maíz es alta, más aún si se trata de una variedad adaptada a suelos potencialmente contaminados (117). La rizosfera de las plantas al exudar ácidos orgánicos se solubilizan los metales y su absorción por las plantas aumenta (67).

Estos resultados concuerdan con los resultados obtenidos en el artículo científico "*Efectos del ácido húmico sobre la absorción de metales pesados por plantas herbáceas en suelos contaminados simultáneamente por hidrocarburos de petróleo*" tuvo como objetivo investigar los efectos del ácido húmico sobre la disponibilidad de metales pesados en el suelo y en 3 especies de plantas herbáceas en un suelo contaminado con metales pesados e hidrocarburos de petróleo. Los resultados revelaron que el ácido húmico disminuyó las formas solubles e intercambiables de los metales en el suelo y, a la misma vez, incrementó formas fitodisponibles para las plantas. También los ácidos húmicos incrementan la absorción de metales pesados por la planta y a su vez disminuye la lixiviación de metales pesados (previene contaminación del subsuelo) (26).

De forma semejante, los resultados obtenidos en el trabajo de investigación "*Fitorremediación con maíz (Zea mays L.) y compost de Stevia en suelos degradados por contaminación con metales pesados*". Donde se observa que la planta de maíz acumula mayor cantidad de cadmio en las raíces 91% respecto a hojas 6% y tallos 3% en todos los tratamientos, además hace mención que la biodisponibilidad de Cd varía en gran medida y las concentraciones de Cd total en el suelo predicen mal absorción de Cd. Además, las enmiendas orgánicas favorecen en alguna medida a una mayor extracción del Cd como en el caso de su estudio de

un suelo de la localidad de Mantaro, el tratamiento MA T2 (vermicompost) con 14.14 mg/kg de Cd y en el suelo de la localidad de Muqui, el tratamiento MU T2 (vermicompost) con 7.71 mg/kg de Cd (5).

De la misma manera, los resultados del trabajo de investigación “*Remoción de cadmio y plomo en suelos a orillas del río Mantaro, Junín, mediante fitorremediación con girasol (*Helianthus annuus*) y maíz (*Zea mays*) usando enmiendas*”. Se puede apreciar que la especie vegetal maíz (*Zea mays L.*) acumula mayor cadmio en la parte radicular de la planta, de esta manera se puede analizar que el maíz tuvo los mejores resultados con los metales pesados en su biomasa radicular y en menor proporción la concentración de Cd en la parte aérea de la planta. También menciona que el maíz junto con enmiendas orgánicas tiene una mayor facilidad de desarrollo dentro de un suelo contaminado (30).

#### **4.3.2. Enmiendas orgánicas y la concentración de cadmio en el suelo**

En esta investigación al determinar cuál es el efecto de las enmiendas orgánicas (vermicompost y compost) en un suelo contaminado con cadmio, se pudo encontrar que, a través de la prueba de análisis de varianza en la tabla 33, se acepta la hipótesis alterna lo cual indica que la concentración de cadmio en el suelo no es igual en los 7 tratamientos. Lo que da a entender que, sí existe un efecto de las enmiendas hacia la concentración del contaminante en el suelo. Esto se sostiene ya que la adición de materia orgánica inmoviliza a los metales, también puede formar compuestos organometálicos, los cuales son más solubles, disponibles y dispersables (64). Además, se menciona que las sustancias húmicas forman complejos estables e insolubles con los contaminantes del suelo, disminuyendo su disponibilidad mientras que los ácidos fúlvicos pueden formar complejos organometálicos solubles con los contaminantes, con un peso molecular menor (123). También es importante resaltar que las reacciones que tiene el cadmio con los diferentes componentes del suelo para disminuir o aumentar su disponibilidad va a depender de factores como pH, textura, capacidad de intercambio catiónico (CIC), materia orgánica y reacciones redox del suelo

(74). En este sentido, según lo mencionado, y analizar los resultados, se confirma que la aplicación de enmiendas orgánicas no solo incrementó la materia orgánica y favoreció la absorción de los metales pesados, sino también redujo la concentración de cadmio en el suelo.

Estos resultados se asemejan a los resultados obtenidos en el artículo científico "*Fitorremediación con maíz (Zea mays L.) y compost de Stevia en suelos degradados por contaminación con metales pesados*", en la que tuvo como objetivo observar el efecto de las enmiendas orgánicas (compost y vermicompost de Stevia), obteniendo como resultado que las enmiendas orgánicas contribuyen a la solubilización de los metales pesados para una mejor absorción y así disminuir su concentración dentro del suelo (5).

Además, los resultados de la tesis "*Remoción de cadmio y plomo en suelos a orillas del río Mantaro, Junín, mediante fitorremediación con girasol (Helianthus annuus) y maíz (Zea mays) usando enmiendas*", teniendo como objetivo determinar la cantidad de cadmio y plomo removido en los suelos contaminados aplicando *Zea mays L.* y *Helianthus annuus* en distintas enmiendas, obteniendo como resultado que la especie maíz, con enmiendas combinadas de humus + compost tiene mejores resultados para la remoción y absorción de metales pesados del suelo (30).

Según la prueba de comparación múltiple de Duncan en la tabla 34, se encontró que, el tratamiento: control, compost a una dosis de 10% y 20%, vermicompost a una dosis de 20% los que tuvieron la menor concentración de cadmio en el suelo, demostrando que las enmiendas orgánicas no influyen en la disminución de la concentración de cadmio en el suelo, haciendo no favorable su aplicación. Esto responde a que la materia orgánica en el suelo incrementa la absorción del cadmio, pero también puede tener un comportamiento opuesto en las disponibilidades del cadmio; la fracción orgánica puede lograr cumplir con la acción de retener el cadmio y hacer que este no se encuentre disponible para las

plantas, cuando se encuentra estabilizada y es resistente a la mineralización (72). Como también la materia orgánica juntamente con la arcilla del suelo y mediante una serie de reacción es fisicoquímica, adsorben los contaminantes y permiten su inmovilización o liberación, de esta forma, la complejación por parte de la materia orgánica del suelo es uno de los procesos que gobiernan la solubilidad y bioasimilación de los metales pesados (64). Por lo que, según lo referido anteriormente y al analizar estos resultados, se confirma que la materia orgánica fue influyente en la inmovilización del cadmio en forma de quelantes o compuestos con enlaces covalentes, disminuyendo en gran parte la forma disponible o soluble del cadmio y así ser absorbida con mayor facilidad por la planta. Además, se tendría en cuenta que las enmiendas son los mejores abonos para mejorar las propiedades del suelo y facilita el desarrollo de la planta como en la asimilación de nutrientes. Lo cual tendría relación con los resultados que a mayor dosis de enmienda orgánica mayor desarrollo de la planta y mayor capacidad de absorción de cadmio, y por otro lado, a menor dosis de enmienda orgánica menor desarrollo de la planta y, por lo tanto, menor capacidad de absorción de cadmio (128).

Estos resultados obtenidos contradicen a los resultados de la tesis *“Efecto de la cal, materia orgánica y EM en el contenido de cadmio de un suelo contaminado en el centro poblado de Huancaní, distrito de Leonor Ordoñez, provincia de Jauja - 2019”*, que tuvo como objetivo determinar el efecto de la cal, enmienda orgánica y EM en el contenido de cadmio, teniendo como resultado un efecto estadísticamente significativo en la disminución de cadmio en el suelo obteniendo un valor de 16.236 mg Cd.kg<sup>-1</sup> con 20% de enmienda orgánica, lo cual significó una disminución del 10.96 con respecto al suelo con enmiendas (34).

De la misma manera, los resultados del artículo científico *“El potencial del maíz (Zea mays) para la fitorremediación de suelos contaminados con cadmio y plomo”*, que tuvo por objetivo determinar el potencial del maíz para la fitorremediación de suelo contaminado con

cadmio, teniendo como resultado que la concentración de cadmio disminuyó significativamente en el suelo con respecto al testigo, en diferentes niveles de contaminación de cadmio (112).

#### **4.3.3. Enmiendas orgánicas y factor de bioacumulación**

En general, la bioacumulación podría definirse como el proceso mediante el cual los organismos absorben sustancias químicas o elementos directamente del medio ambiente (68). Para identificar el factor de bioacumulación del cadmio se procede a realizar la determinación de los factores de bioconcentración del elemento potencialmente tóxico (Cd) en la raíz y la parte aérea de la *Zea mays*.

En la prueba de Kruskal Wallis, presentado en la tabla 36, demuestra que la aplicación de enmiendas orgánicas (vermicompost y compost) no tiene efecto en el factor bioconcentración de Cd en la parte aérea del *Zea mays L.*, esto se debería a que en todos los tratamientos aplicados (vermicompost y compost) presentan valores de FBC < 1, lo que califica al *Zea mays* como una planta excluyente y que no bioacumula cadmio en la parte aérea. al respecto se menciona que si el FBC aérea < 1 la planta es excluyente, si el  $1 < \text{FBC aérea} > 10$  la planta es acumuladora y si el FBC aérea > 10 la planta es hiperacumuladora (110).

Según la comparación múltiple de Duncan, presentado en la tabla 39, muestra que los tratamientos con vermicompost presentaron un mayor factor de bioconcentración de Cd en la parte radicular del *Zea mays L.* demostrando que existe un efecto de esta enmienda orgánica en la absorción de Cd en la parte radicular, logrando que el factor de bioconcentración en la raíz sea > 1. Al respecto se menciona que si el FBC raíz < 1 la planta es excluyente, si el  $1 < \text{FBC raíz} > 10$  la planta es acumuladora y si el FBC raíz > 10 la planta es hiperacumuladora; bajo este principio, en el trabajo de investigación se deduce que *Zea mays L.* es una planta acumuladora de cadmio en la parte radicular (109). La fitoestabilización es la inmovilización de contaminantes en el suelo a través de la absorción, adsorción y acumulación en las raíces, estos

mecanismos conducen a la estabilización física de suelos a través de la reducción de movilidad, toxicidad o biodisponibilidad (103).

La bioconcentración en la raíz se da principalmente por la facilidad que viene a tener la raíz para poder absorber el metal pesado en comparación con el transporte o traslocación del cadmio hacia los diferentes órganos de la parte aérea de la planta; esto debido a que la raíz constituye el tejido de entrada principal de metales pesados de la planta, los mismos que logran llegar hasta ella, por procesos de difusión en el medio, flujo masivo o intercambio catiónico (116).

Muchas enmiendas tienen un componente de carbono soluble o genera productos de descomposición solubles, y la materia orgánica soluble puede incrementar la solubilidad al formar complejos órgano metales solubles (125). El vermicompost por sus características aporta al suelo materia orgánica, está MO mediante una serie de reacciones fisicoquímicas forman complejos con los metales y de esta manera la complejación por parte de la MO del suelo es uno de los procesos que gobiernan la solubilidad y bioasimilación de los metales pesados; así, la toxicidad de los metales pesados se ve potenciada por la tendencia de formación de compuestos organometálicos, los cuales son más solubles, disponibles y dispersables (64). El incremento de aniones tanto inorgánicos como orgánicos en la solución suelo puede también formar complejos catiónicos metálicos y tal reacción afecta la biodisponibilidad de los metales (66). Las raíces de la planta exudan ácidos orgánicos que solubilizan metales, estos exudados orgánicos de la raíces pueden actuar como agentes complejantes de metales, incrementando así la absorción del metal (67).

Por otro lado, el vermicompost está conformado por ácido húmicos y ácidos fúlvicos, donde los ácidos fúlvicos que contiene, forman complejos órgano-metálicos solubles con los contaminantes, con un peso molecular menor, aumentando su solubilidad, disponibilidad y dispersión (123). Estos ácidos son una mezcla de ácidos orgánicos (alifáticos débiles

y aromáticos) las cuales son solubles en agua en todas las condiciones de pH (ácido, neutro y alcalino), tienen un contenido de oxígeno dos veces mayor que el de los ácidos húmicos (AH) y grupos carboxilos (COOH) e hidroxilos (COH), en consecuencia, estos AF son más reactivos químicamente, por ende la capacidad de intercambio de AF es el doble que el de AH y esa alta capacidad de intercambio se debe al número total de los grupos carboxilos presentes (113). El tamaño de ácidos fúlvicos es más chico que los ácidos húmicos y por ese tamaño minúsculo que presentan las moléculas de AF pueden ingresar rápidamente a las raíces de plantas, tallos y hojas (135). Los ácidos húmicos forman fácilmente sales con elementos minerales traza inorgánicos. Un análisis de los extractos de AH ocurridos naturalmente va a revelar la presencia de más de 60 elementos minerales diferentes presentes. Estos elementos traza, están unidos a las moléculas de AH en una forma que se puede usar fácilmente por varios organismos vivos. Por lo que la función del AH es tan importante como los sistemas de intercambio de iones y sistemas de metales complejos llamadas quelantes (131).

Estos resultados son similares a los encontrados en el trabajo de investigación "*Fitorremediación con maíz (Zea mays L.) y compost de Stevia en suelos degradados por contaminación con metales pesados*", donde se tuvo como objetivo observar el efecto de las enmiendas orgánicas (compost y vermicompost de Stevia) en la fitorremediación con maíz (*Zea mays*). Los resultados muestran al maíz como planta fitorremediadora que absorbe cadmio en la parte de la raíz, ratificando que la aplicación de enmiendas orgánicas ayudan a solubilizar el Pb y Cd del suelo, donde el vermicompost fue el más efectivo absorbiendo los metales pesados del suelo; los factores de bioconcentración afirman que el maíz es exclusora o estabilizadora (5).

Asimismo, los resultados obtenidos tienen similitud con lo hallado en el trabajo de investigación "*Remoción de cadmio y plomo en suelos a orillas del río Mantaro, Junín, mediante fitorremediación con girasoles (Helianthus annuus) y maíz (Zea mays) usando enmiendas*", donde se tuvo

como objetivo determinar la cantidad de cadmio y plomo removido en suelos contaminados, aplicando *Zea mays* (maíz) y *Helianthus annuus* (girasol) con distintas enmiendas orgánicas, mediante la técnica de fitorremediación. En un tiempo de 64 días los resultados obtenidos con un nivel de confianza al 95% determina la remoción de metales en el suelo, con un 11% de remoción de cadmio con las respectivas plantas empleadas, siendo la mayor concentración de los metales en la biomasa radicular, y teniendo mejores resultados con el maíz usando compost más humus. Finalmente, el estudio demuestra que la mejor especie para remover metales fue, *Zea mays* con 76.22 mg/kg de plomo removido en su biomasa radicular y un valor de 2.18 mg/kg de cadmio removido en su biomasa radicular (30).

Así mismo, los resultados del presente experimento tienen relación con lo encontrado en el trabajo de tesis "*Solubilidad de metales pesados / metaloides en muestras de suelo contaminado con múltiples metales de un área de procesamiento de mineral de oro: efectos de sustancias húmicas*", donde se aplicó niveles de sustancias húmicas en muestras de suelo, que se encontraban con diferentes niveles de contaminación; con el objetivo del estudio de la solubilidad de metales pesados. Los resultados demostraron que los tratamientos con ácido húmico aumentaron la solubilidad del cadmio en los suelos y los tratamientos con ácidos fúlvicos redujeron la movilidad y disponibilidad de este metal; el uso del ácido húmico incrementa la disponibilidad de metales pesados en plantas favoreciendo a proyectos de remediación y el uso de ácido fúlvicos para reducir la disponibilidad de metales pesados en plantas, este puede ser utilizado en lugares contaminados con un alto riesgo de introducción de metales hacia la cadena alimenticia (25).

De forma semejante, en el artículo científico "*Efectos del ácido húmico sobre la absorción de metales pesados por plantas herbáceas en suelos contaminados simultáneamente por hidrocarburos de petróleo*" tuvo como objetivo investigar los efectos del ácido húmico sobre la disponibilidad de metales pesados en el suelo y en 3 especies de plantas

herbáceas en un suelo contaminado con metales pesados e hidrocarburos de petróleo. Los resultados revelaron que el ácido húmico disminuyó las formas solubles e intercambiables de los metales en el suelo y a la misma vez incrementó formas fitodisponibles para las plantas; el ácido húmico también incrementó la acumulación de cadmio en las raíces y brotes de las plantas herbáceas, los resultados demuestran que la enmienda de ácido húmico (HA) aumenta la absorción de metales pesado por la planta y a su vez disminuye la lixiviación de metales pesados (previene contaminación del subsuelo) (26).

#### **4.3.4. Enmiendas orgánicas y factor de traslocación**

En la prueba de comparación múltiple de Duncan, presentado en la tabla 42, muestra que los tratamientos con compost presentan un mayor factor de traslocación de Cd en el *Zea mays L.* demostrando que existe un efecto de esta enmienda orgánica en la traslocación de la parte radicular a la foliar, pero este incremento es mínimo, ya que el factor de traslocación sigue siendo muy bajo. También se encuentra que el tratamiento control también presenta un incremento en el factor de traslocación, esto se debería, a que para el transporte de metales pesados hacia la parte aérea (fitoextracción) existe solo una ruta, el xilema, a diferencia de las diferentes formas de ingreso de metales pesados a la raíz, y sobre todo que aparte de ello para la traslocación se requiere dos fuerzas para que esto ocurra, que son la osmosis y la fuerza de succión, las cuales no dependen propiamente de la planta ni del suelo, en este caso depende de la presión osmótica y de la pérdida de agua respectivamente (116).

Los iones inorgánicos y el agua se transportan desde la raíz hasta la parte aérea mediante un conjunto de células tubulares que pertenecen a un tejido leñoso (xilema), la fuerza que mueva esta solución no es debido a las células del tejido xilemático, sino se basa a la fuerza propia del proceso de ósmosis y la fuerza de succión. La ósmosis se produce debido a la existencia de una gran diferencia de concentración en la parte superior de la planta (hijas, inflorescencias) donde es mayor y la parte

inferior, es decir que hay la existencia de un potencial hídrico favorable al impulso ascendente. La fuerza de succión se genera cuando en las hojas hay una pérdida de agua por transpiración, pues las moléculas perdidas producen una succión de nuevas moléculas cercanas para reemplazar a las anteriores y de esta manera se produce una fuerza que atrae agua desde las raíces hacia las hojas (53).

La especie vegetal maíz tiene una mayor acumulación en la parte radicular de la planta, con un alto rango de proporción para cadmio en la biomasa radicular y en menor proporción de cadmio en la parte aérea (30).

## CONCLUSIÓN

1. El compost y el vermicompost influyen significativamente en el incremento de la concentración de cadmio total en el *Zea mays L.*, en un suelo agrícola contaminado con cadmio de Leonor Ordoñez, Jauja; el cadmio total se incrementó en el rango de 6.94 mg/kg a 13.79 mg/kg respecto al tratamiento control; siendo los tratamientos con vermicompost a una dosis de 5%, 10% y 20% las que tuvieron los mejores resultados.
2. El compost y el vermicompost no influyen significativamente en la disminución de la concentración de cadmio total en el suelo agrícola de Leonor Ordoñez al final del experimento; la concentración de cadmio total en el suelo se incrementó en el rango de 7.38 mg/kg a 8.77 mg/kg con respecto al tratamiento control, siendo el T7 (control), T6 (20% CO), T5 (10% CO) y T3 (20% VC) los que tuvieron la menor concentración de cadmio en el suelo.
3. El compost y el vermicompost influyen en el incremento del factor de bioacumulación y de traslocación del cadmio en el *Zea mays L.*; el factor de bioconcentración (FBC) en la raíz varió en un rango de 0.59 a 1.23 con respecto al tratamiento control, siendo los tratamientos con vermicompost a una dosis de 5%, 10% y 20% los que presentan un mayor incremento en el factor de bioconcentración en el *Zea mays L.*; el factor de traslocación (FT) varió mínimamente en un rango de 0.08 a 0.1 con respecto al tratamiento control, siendo los tratamientos con compost a una dosis de 5%, 10% y 20% los que presentan un incremento en el factor de traslocación en el *Zea mays L.*

## RECOMENDACIÓN

1. Evaluar con otros niveles diferentes de compost y vermicompost para observar la variación de la concentración de cadmio en suelos agrícolas y en el proceso de fitorremediación.
2. Evaluar diferentes fuentes de enmiendas orgánicas, aparte del vermicompost y compost, solos y en interacción, en la variación de la concentración de cadmio total en suelos agrícolas y su influencia en el proceso de fitorremediación.
3. Caracterizar las formas iónicas del cadmio en el suelo, para poder estimar con certeza su biodisponibilidad y movilidad en suelos agrícolas del valle del Mantaro.
4. Aplicar la alternativa de fitorremediación con enmiendas orgánicas haciendo uso de otras especies fitorremediadoras para determinar tasas de absorción y distribución en las diferentes partes de la planta.
5. Evaluar la efectividad de la fitorremediación con *Zea mays L.* y el uso de enmiendas orgánicas en diferentes tipos de suelos contaminados con metales pesados.
6. Evaluar el comportamiento de los ácidos húmicos y fúlvicos en la disponibilidad del cadmio en el *Zea mays L.*
7. Las enmiendas orgánicas por utilizarse deben producirse abundantemente y no tener problemas de adquisición en la zona donde se pretenda aplicar, además deben presentar una baja concentración de cadmio u otros metales pesados para no incrementar la concentración de metales en el suelo.
8. Realizar ensayos *in situ* utilizando la planta fitorremediadora del *Zea mays L.* y el uso de enmiendas orgánicas (vermicompost y compost), para evaluar el

efecto en la disminución de la concentración de cadmio en el suelo y a biodisponibilidad para la planta.

9. Llevar a cabo la experimentación durante todo el proceso de desarrollo del *Zea mays L.* hasta la cosecha, para evaluar la concentración de cadmio en las diferentes partes del maíz.
10. Los estudios de recuperación de suelos contaminados donde se utiliza la fitorremediación con *Zea mays L.* como alternativa, deben considerar el tiempo de fitoestabilización, así como dirigir la atención a efectos de largo plazo.

## LISTA DE REFERENCIAS

1. **Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.** *Estado mundial del recurso suelo.* [online]. Roma: FAO, 2016. [Accessed 12 March 2021]. Available from: <https://www.fao.org/3/i5126s/i5126s.pdf>
2. **CERRÓN, V.** *Impacto de la contaminación de las aguas ácidas provenientes de las empresas mineras en la cuenca hidrográfica del río Mantaro y su efecto en la producción agrícola del valle del Mantaro.* Huancayo: Universidad Continental, 2009.
3. **Ministerio de Energía y Minas.** *Cuenca del río Mantaro.* [online]. 1997. [Accessed 6 March 2021]. Available from: <http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/DGAAM/publicaciones/evats/mantaro/mantaro1.pdf>
4. **MUNIVE CERRÓN, Rubén; GAMARRA SÁNCHEZ, Gilberto; MUNIVE YACHACHI, Yveth; PUERTAS RAMOS, Fernando; VALDIVIEZO GONZÁLES, Lorgio; CABELLO TORRES, Rita.** Absorción de plomo y cadmio por girasol de un suelo contaminado y remediado con enmiendas orgánicas en forma de compost y vermicompost. *Scientia Agropecuaria.* 8 June 2020. Vol. 11, no. 2, p. 177–186. DOI 10.17268/sci.agropecu.2020.02.04.
5. **MUNIVE CERRÓN, Rubén; LOLI FIGUEROA, Oscar; AZABACHE LEYTON, Andrés; GAMARRA SÁNCHEZ, Gilberto.** Fitorremediación con Maíz (*Zea mays L.*) y compost de Stevia en suelos degradados por contaminación con metales pesados. *Scientia Agropecuaria.* 31 December 2018. Vol. 9, no. 4, p. 551–560. DOI 10.17268/sci.agropecu.2018.04.11.
6. **CHARRUPI RIASCOS, Natali; MARTÍNEZ NOVOA, Diana Carolina.** *Estudio ambiental del cadmio y su relación con suelos destinados al cultivo de cacao en los departamentos de Arauca y Nariño.* Bogotá: Universidad de la Salle, 2017.
7. **VOLKE SEPÚLVEDA, Tania; VELASCO TREJO, Juan Antonio.** *Suelos contaminados por metales y metaloides: muestreo y alternativas para su remediación* [online]. Instituto Nacional de Ecología, 2005. ISBN 978-968-817-492-0. Available from: <https://books.google.com.pe/books?id=A50ITx37ScsC>

8. **YUN SHENG, Xia; BAO DONG, Chen; PETER, Christie, F.; ANDREW, Smith; YOU SHAN, Wang; XIAO LIN, Li.** Arsenic uptake by arbuscular mycorrhizal maize (*Zea mays L.*) grown in an arsenic-contaminated soil with added phosphorus. *Journal of Environmental Sciences (China)*. 2007. Vol. 19, no. 10, p. 1245–1251. DOI 10.1016/s1001-0742(07)60203-4.
9. **CÓRDOVA, Salomé; NEAMAN, Alexander; GONZÁLEZ, Isabel; GINOCCHIO, Rosanna; FINE, Pinchas.** The effect of lime and compost amendments on the potential for the revegetation of metal-polluted, acidic soils. *Geoderma*. 30 October 2011. Vol. 166, no. 1, p. 135–144. DOI 10.1016/j.geoderma.2011.07.022.
10. **MIRANDA, Diego; CARRANZA, Carlos; ROJAS, Carlos Andrés; JEREZ, Carlos Martín; FISCHER, Gerhard; ZURITA, Jorge.** Acumulación de metales pesados en suelo y plantas de cuatro cultivos hortícolas, regados con agua del río Bogotá. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*. 2008. Vol. 2, no. 2, p. 180–191. DOI 10.17584/rcch.2008v2i2.1186.
11. **CASTRO GONZÁLEZ, Pedro Andrés; BRÍÑEZ RODRÍGUEZ, Reisele Alina.** *Diseño del destino ambiental de los metales plomo y cadmio a partir de la determinación del factor de bioconcentración en cultivos de lechuga (Lactuca sativa) y pasto (Pennisetum clandestinum), mediante un enfoque CTSA*. [online]. Bogotá: Universidad Pedagógica Nacional, 2012. [Accessed 12 February 2021]. Available from:  
[https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/21726/45315\\_61869.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/21726/45315_61869.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
12. **HERRERA MARCANO, Teodoro.** La contaminación con cadmio en suelos agrícolas. *Venesuelos* [online]. 2011. [Accessed 15 February 2021]. Available from:  
[http://saber.ucv.ve/ojs/index.php/rev\\_venes/article/view/1112](http://saber.ucv.ve/ojs/index.php/rev_venes/article/view/1112)
13. **SÁNCHEZ BARRÓN, Gara.** *Ecotoxicología del cadmio: riesgo para la salud de la utilización de suelos ricos en cadmio* [online]. España: Universidad Complutense, 2016. [Accessed 20 February 2021]. Available from:  
<http://147.96.70.122/Web/TFG/TFG/Memoria/GARA%20SANCHEZ%20BARRON.pdf>
14. **Ministerio de Agricultura y Riego.** *Plan estratégico sectorial multianual 2012-2016* [online]. 2012. [Accessed 16 February 2021]. Available from:

[https://www.peru.gob.pe/docs/PLANES/14282/PLAN\\_14282\\_2015\\_PESEM.PDF](https://www.peru.gob.pe/docs/PLANES/14282/PLAN_14282_2015_PESEM.PDF)

15. \_\_\_\_\_. *Reducción de la degradación de suelos agrarios-Anexo 2*. [online]. Perú: MINAGRI, 2017. [Accessed 3 March 2021]. Available from: <https://www.midagri.gob.pe/portal/download/programas-presupuestales/inf-programa/anexo2-pp89-2017.pdf>
16. **LOAYZA, Raúl**. Daños ambientales de la minería en el Perú. *III Conferencia Académica* [online]. 2015. [Accessed 16 February 2021]. Available from: <http://www.metasbicentenario.consortio.edu.pe/mineria-y-ambiente/extenso-danos-ambientales-de-la-mineria-en-el-peru-que-hacer-con-ellos/>
17. **DELGADILLO LÓPEZ, Angélica Evelin; GONZÁLEZ RAMÍREZ, César Abelardo; PRIETO GARCÍA, Francisco; VILLAGÓMEZ IBARRA, José Roberto; ACEVEDO SANDOVAL, Otilio**. Fitorremediación: una alternativa para eliminar la contaminación. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*. August 2011. Vol. 14, no. 2, p. 597–612.
18. **AGUDELO BETANCUR, Lina Marcela; MACIAS MAZO, Karina Isabel; SUÁREZ MENDOZA, Alfredo José**. Fitorremediación: la alternativa para absorber metales pesados de los biosólidos. *Revista Lasallista de Investigación*. 2005. P. 5.
19. **BRANZINI, Agustina; ZUBILLAGA, Marta**. Evaluación de la fitotoxicidad de metales pesados en suelos rehabilitados. *International journal of phytoremediation*. 26 April 2010. Vol. 12, p. 335–42. DOI 10.1080/15226510902968126.
20. **CHINCHAY INGA, Mileny; CHAMORRO RICALDI, Kendi Isaac**. *Fitorremediación de suelos contaminados por metales (Plomo y Cadmio) mediante planta nativa Maiz “Zea mays. L” en la minería*. [online]. 2020. [Accessed 23 February 2021]. Available from: <https://repositorio.upeu.edu.pe/handle/20.500.12840/3195>
21. **NÚÑEZ LÓPEZ, Roberto Aurelio; MEAS VONG, Yunny; ORTEGA BORGES, Raúl; OLGUÍN, Eugenia J.** *Fitorremediación: fundamentos y aplicaciones*. [online]. 2004. [Accessed 13 March 2021]. Available from: [https://www.revistaciencia.amc.edu.mx/images/revista/55\\_3/Fitorremediacion.pdf](https://www.revistaciencia.amc.edu.mx/images/revista/55_3/Fitorremediacion.pdf)

22. **VALDERRAMA, José O.** *Información Tecnológica* [online]. Centro de Información Tecnológica, 1996. [Accessed 12 April 2021]. Available from: <https://books.google.com.pe/books?id=BTMZu5vozvMCGoogle-Books-ID:BTMZu5vozvMC>
23. **AMEZCUA ÁVILA, Alma Victoria; HERNÁNDEZ ACOSTA, Elizabeth; DÍAZ VARGAS, Prócoro.** Fitorremediación de residuos de minas contaminados con metales pesados. *Revista Iberoamericana de Ciencias* [online]. 1 August 2020. [Accessed 25 March 2021]. Available from: [https://www.researchgate.net/profile/Elizabeth-Acosta-2/publication/343380921\\_Fitorremediacion\\_de\\_residuos\\_de\\_minas\\_contaminados\\_con\\_metales\\_pesados/links/5f46bf9ba6fdcc14c5c755d7/Fitorremediacion-de-residuos-de-minas-contaminados-con-metales-pesados.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Elizabeth-Acosta-2/publication/343380921_Fitorremediacion_de_residuos_de_minas_contaminados_con_metales_pesados/links/5f46bf9ba6fdcc14c5c755d7/Fitorremediacion-de-residuos-de-minas-contaminados-con-metales-pesados.pdf)
24. **CUEVAS, Gabriela; WALTER, Ingrid.** Metales pesados en maíz (*Zea mays L.*) cultivado en un suelo enmendado con diferentes dosis de compost de lodo residual. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* [online]. 2004. [Accessed 21 February 2021]. Available from: <https://www.revistascca.unam.mx/rica/index.php/rica/article/view/23120>
25. **BOECHAT, Cácio Luiz; PISTÓIA, Vítor Caçula; LUDTKE, Ana Cristina, GIANELLO, Clesio; CAMARGO, Flávio Anastácio.** Solubility of Heavy Metals/Metalloid on Multi-Metal Contaminated Soil Samples from a Gold Ore Processing Area: Effects of Humic Substances. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* [online]. 2016. Vol. 40. [Accessed 23 February 2021]. Available from: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_abstract&pid=S0100-06832016000100528&lng=es&nrm=iso&tlng=en](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0100-06832016000100528&lng=es&nrm=iso&tlng=en)
26. **PARK, Soyoung; KIM, Ki Seob; KANG, Daesok; YOON, Hansam; SUNG, Kijune.** Effects of humic acid on heavy metal uptake by herbaceous plants in soils simultaneously contaminated by petroleum hydrocarbons. *Environmental earth sciences* [online]. 2013. [Accessed 23 February 2021]. Available from: <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=US201400103867>
27. **RAMÍREZ GOTTFRIED, Ricardo Israel; GARCÍA CARRILLO, Mario; ÁLVAREZ REYNA, Vicente de Paul; GONZÁLEZ CERVANTES, Guillermo; HERNÁNDEZ, Vicente.** Potencial fitorremediador de la chicura (*Ambrosia ambrosioides*) en suelos contaminados por metales pesados.

- Revista mexicana de ciencias agrícolas*. November 2019. Vol. 10, no. 7, p. 1529–1540. DOI 10.29312/remexca.v10i7.1731.
28. **ZUBILLAGA, Marta Susana**. *Remediación de suelos forrajeros contaminados con metales pesados: impacto de la aplicación de residuos orgánicos y fitoextracción* [online]. Universidade da Coruña, 2013. [Accessed 23 February 2021]. Available from: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=38178>
29. **SALAZAR, María Julieta**. *Fitorremediación de suelos contaminados con metales pesados. Evaluación de especies nativas en la provincia de Córdoba* [online]. Argentina: Universidad Nacional de Córdoba, 2019. [Accessed 23 February 2021]. Available from: <https://rdu.unc.edu.ar/handle/11086/12720> Accepted: 2019-09-05T15:59:10Z
30. **GRANDEZ ARGOMEDA, Máximo Gabriel**. *Remoción de cadmio y plomo en suelos a orillas del río Mantaro, Junín, mediante fitorremediación con girasol (*Helianthus annuus*) y maíz (*Zea mays*) usando enmiendas*. [online]. Lima, Perú: Universidad César Vallejo, 2017. [Accessed 1 March 2021]. Available from: [https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/3537/Grandez\\_AMGA.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/3537/Grandez_AMGA.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
31. **BUSTAMANTE CARRIÓN, Manuel Enrique**. *Efecto de la aplicación de estiércol de lombriz en la disponibilidad de arsénico y cromo, en un cultivo de maíz del distrito de Orcotuna, Concepción-2016* [online]. Huancayo: Universidad Continental, 2018. [Accessed 19 February 2021]. Available from: [https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/4650/4/IV\\_FIN\\_107\\_TE\\_Bustamante\\_Carrion\\_2018.pdf](https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/4650/4/IV_FIN_107_TE_Bustamante_Carrion_2018.pdf)
32. **FALCON ESTRELLA, Johana Vanessa**. *Fitoextracción de metales pesados en suelo contaminado con *Zea mays* L. en la estación experimental el Mantaro - Junín” en el año 2016*. [online]. Huancayo: Universidad Nacional del Centro del Perú, 2017. [Accessed 28 February 2021]. Available from: <https://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/4611>
33. **MUNIVE CERRÓN, Rubén Víctor**. *Recuperación de suelos degradados por contaminación con metales pesados en el valle del Mantaro mediante*

- compost de Stevia y fitorremediación*. Lima, Perú: Universidad Nacional Agraria la Molina, 2018.
34. **SAPAICO CHANCASANAMPA, Yosselyn**. *Efecto de la cal, materia orgánica y EM en el contenido de cadmio de un suelo contaminado en el centro poblado de Huancaní, distrito de Leonor Ordoñez, provincia de Jauja - 2019* [online]. Huancayo: Universidad Continental, 2020. [Accessed 19 February 2021]. Available from: [https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/8166/1/IV\\_FIN\\_107\\_TE\\_Sapaico\\_Chancasanampa\\_2020.pdf](https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/8166/1/IV_FIN_107_TE_Sapaico_Chancasanampa_2020.pdf)
35. **RODRÍGUEZ EUGENIO, N.; MCLAUGHLIN, M.; PENNOCK, D.** *La contaminación del suelo: una realidad oculta* [online]. Italia: FAO, 2018. [Accessed 5 August 2021]. Available from: <https://www.fao.org/publications/card/es/c/l9183ES/>
36. **DÍAZ, Walter**. Estrategia de gestión integrada de suelos contaminados en el Perú. *Revista del Instituto de investigación de la Facultad de minas, metalurgia y ciencias geográficas*. 15 December 2016. Vol. 19, no. 38, p. 103–110. DOI 10.15381/iigeo.v19i38.13575.
37. **RODRÍGUEZ JIMÉNEZ, Juan José**. *La contaminación de los suelos. La herencia que no cesa* [online]. Sevilla: Universidad Internacional de Andalucía, 2008. [Accessed 15 July 2021]. Available from: <https://dspace.unia.es/handle/10334/2523>
38. **COVARRUBIAS, Sergio Abraham; CABRIALES, Juan José**. Contaminación ambiental por metales pesados en México: problemática y estrategias de fitorremediación. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. 5 April 2017. Vol. 33, no. 0, p. 7–21. DOI 10.20937/RICA.2017.33.esp01.01.
39. **REYES, Yulieth; VERGARA, Inés; TORRES, Omar; DÍAZ, Mercedes; GONZÁLEZ, Edgar Emir**. Contaminación por metales pesados: Implicaciones en salud, ambiente y seguridad alimentaria. *Ingeniería Investigación y Desarrollo: I2+D*. 2016. Vol. 16, no. 2, p. 66–77.
40. **PRIETO MÉNDEZ, Judith; GONZÁLEZ RAMÍREZ, César A.; ROMÁN GUTIÉRREZ, Alma D.; PRIETO GARCÍA, Francisco**. Contaminación y Fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*. 2009. P. 29–44.

41. **OSTOLAZA FARRO, Juan Carlos.** *Silicato de magnesio en la concentración de plomo y cadmio en el maíz (Zea mays) en condiciones de invernadero.* [online]. Lima - Perú: Universidad Nacional Agraria la Molina, 2020. [Accessed 8 March 2021]. Available from:  
<http://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/UNALM/4367/ostolaza-farro-juan-carlos.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
42. **GONZÁLEZ ULIBARRY, Paco.** Consecuencias ambientales de la aplicación de fertilizantes. *Biblioteca del Congreso Nacional de Chile* [online]. 2019. [Accessed 8 March 2021]. Available from:  
[https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/27059/1/Consecuencias\\_ambientales\\_de\\_la\\_aplicacion\\_de\\_fertilizantes.pdf](https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/27059/1/Consecuencias_ambientales_de_la_aplicacion_de_fertilizantes.pdf)
43. **EUGERCIOS SILVA, Ana Rolindes; ÁLVAREZ COBELAS, Miguel, MONTERO GONZÁLEZ, Esperanza.** Impactos del nitrógeno agrícola en los ecosistemas acuáticos. *Ecosistemas*. 27 April 2017. Vol. 26, no. 1, p. 37–44. DOI 10.7818/ECOS.2017.26-1.06.
44. **LÓPEZ MOSQUERA, Elvira; SAINZ OSÉS, Jesús.** *Gestión de residuos orgánicos de uso agrícola.* 1 ed. España, 2011. ISBN 978-84-9887-822-6.
45. **ÁVILA, Juan Pablo; REINOSO, Paola; ZAMBRANO, Sandra.** Contaminación difusa producida por actividades agrícolas. *Galileo*. 2013. P. 8.
46. **DEL PUERTO RODRÍGUEZ, Asela M.; SUÁREZ TAMAYO, Susana; PALACIO ESTRADA, Daniel E.** Efectos de los plaguicidas sobre el ambiente y la salud. *Revista Cubana de Higiene y Epidemiología*. December 2014. Vol. 52, no. 3, p. 372–387.
47. **JIMÉNEZ BALLESTA, Raimundo.** *Introducción a la contaminación de suelos* [online]. Mundi-Prensa Libros, 2017. [Accessed 24 March 2021]. ISBN 978-84-8476-789-3. Available from:  
<https://books.google.com.pe/books?id=iZg6DwAAQBAJ>
48. **AMBISAT.** *Actividades industriales generadoras de sustancias contaminantes.* [online]. Panamá, 2004. [Accessed 8 March 2021]. Available from:  
[https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/prevencion-y-gestion-residuos/ACTIVIDADES\\_GENERADORAS\\_tcm30-170351.pdf](https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/prevencion-y-gestion-residuos/ACTIVIDADES_GENERADORAS_tcm30-170351.pdf)

49. **CAVIEDES RUBIO, Diego Iván; RICARDO DELGADO, Daniel; OLAYA AMAYA, Alfredo.** Remoción de metales pesados comúnmente generados por la actividad industrial, empleando macrófitas neotropicales. *Producción + Limpia*. 2016. Vol. 11, no. 2, p. 126–149. DOI 10.22507/pml.v11n2a11.
50. **GALLARDO MARTÍNEZ, Damaris; CABRERA DÍAZ, Ileana; BRUGUERA AMARAN, Noel; MADRAZO ESCALONA, Felipe.** Evaluación de impactos ambientales provocados por la actividad minera en la localidad de Santa Lucía, Pinar del Río. *Revista Avances* [online]. 2013. Vol. 15, no. 1. [Accessed 25 March 2021]. Available from:  
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5350852>
51. **NOLASCO, Silvia.** *Impactos de la minería metálica en centro américa*. [online]. 2011. [Accessed 8 March 2021]. Available from:  
[https://dev.landmatrix.org/media/uploads/source-internationalorgwp-content/uploads/2012/11/impactos\\_de\\_la\\_mineria\\_metatica\\_en\\_centroamerica.pdf](https://dev.landmatrix.org/media/uploads/source-internationalorgwp-content/uploads/2012/11/impactos_de_la_mineria_metatica_en_centroamerica.pdf)
52. **OYARZUN, Roberto; HIGUERAS, Pablo; LILLO, Javier.** *Minería ambiental: una introducción a los impactos de su remediación*. [online]. España: GEMM, 2011. [Accessed 8 March 2021]. Available from:  
[https://eprints.ucm.es/id/eprint/14046/1/Libro\\_Mineria\\_MA.pdf](https://eprints.ucm.es/id/eprint/14046/1/Libro_Mineria_MA.pdf)
53. **NAVARRO AVIÑÓ, J. P.; AGUILAR ALONSO, I.; LÓPEZ MOYA, J. R.** Aspectos bioquímicos y genéticos de la tolerancia y acumulación de metales pesados en plantas. *Ecosistemas* [online]. 2007. Vol. 16. [Accessed 27 June 2021]. Available from:  
<https://www.revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/125>
54. **GONZÁLEZ HUECAS, Concepción; LÓPEZ LAFUENTE, Antonio; MORENO MERINO, Luis; MARTÍN GÓMEZ, Del Carmen; LÓPEZ FERNÁNDEZ, Gloria.** Estudio de la influencia de los suelos contaminados por metales pesados en las aguas naturales. *Real Academia Nacional de Farmacia*. 2003. P. 30.
55. **GARCÍA, Carlos; MORENO, J. L.; HERNÁNDEZ FERNÁNDEZ, María Teresa; POLO, Alfredo.** Metales pesados y sus implicaciones en la calidad del suelo. *Centro de Ciencias Medioambientales* [online]. 2002. [Accessed 8 July 2021]. Available from:  
<https://digital.csic.es/handle/10261/111812>

56. **BARRIO VEGA, Noelia.** *Metales pesados en suelos y sus efectos sobre la salud.* [online]. 2017. [Accessed 20 April 2021]. Available from: <http://147.96.70.122/Web/TFG/TFG/Memoria/NOELIA%20BARRIO%20VEGA.pdf>
57. **AZABACHE LEYTON, Andrés Alberto.** *Aplicación de enmiendas orgánicas en la disponibilidad de cromo en un suelo contaminado de Orcotuna, Concepción, Junín.* [online]. Tesis Doctoral. Lima - Perú: Universidad Nacional Federico Villarreal, 2017. [Accessed 19 March 2021]. Available from: <http://repositorio.unfv.edu.pe/handle/UNFV/1985>
58. **BAUTISTA ZÚÑIGA, Francisco.** *Introducción al estudio de la contaminación del suelo por metales pesados* [online]. Mexico: UADY, 1999. [Accessed 8 March 2021]. ISBN 978-968-7556-81-9. Available from: <https://books.google.es/books?id=yE2Jq3z7ex4C>
59. **ARTEAGA ALONSO, Roberto.** *Fabricación y uso de nanopartículas metálicas con sistemas productivos agrícolas.* [online]. México, 2007. [Accessed 17 April 2021]. Available from: <https://ciqa.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1025/473/1/Roberto%20Arteaga%20Alonso.pdf>
60. **BELTRÁN PINEDA, Mayra Eleonora; GÓMEZ RODRÍGUEZ, Alida Marcela.** Biorremediación de metales pesados cadmio (Cd), cromo (Cr) y mercurio (Hg), mecanismos bioquímicos e ingeniería genética: una revisión. *Revista Facultad de Ciencias Básicas.* 25 July 2016. Vol. 12, no. 2, p. 172–197. DOI 10.18359/rfcb.2027.
61. **ANTELO, Juan; AVENA, Marcelo; FIOL, Sarah; LÓPEZ, Rocío; ARCE, Florencio.** Effects of pH and ionic strength on the adsorption of phosphate and arsenate at the goethite–water interface. *Journal of Colloid and Interface Science.* 15 May 2005. Vol. 285, no. 2, p. 476–486. DOI 10.1016/j.jcis.2004.12.032.
62. **RIMASSA CARRASCO, M. Adriana; LEÓN, Olga; ACEVEDO, Edmundo.** *Metales pesados y biodisponibilidad.* [online]. 2006. [Accessed 2 April 2021]. Available from: <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/120316>
63. **REICHMAN, Suzie.** The Responses of Plants to Metal Toxicity: A review focusing on Copper, Manganese and Zinc. *Australian minerals & energy*

- environment foundation* [online]. 1 January 2002. Vol. 7. [Accessed 23 March 2021]. Available from:  
[https://www.researchgate.net/publication/236160522\\_The\\_Responses\\_of\\_Plants\\_to\\_Metal\\_Toxicity\\_A\\_review\\_focusing\\_on\\_Copper\\_Manganese\\_and\\_Zinc](https://www.researchgate.net/publication/236160522_The_Responses_of_Plants_to_Metal_Toxicity_A_review_focusing_on_Copper_Manganese_and_Zinc)
64. **PÉREZ GONZÁLEZ, Gustavo.** *Disponibilidad de metales tóxico en sitios contaminados.* [online]. España: Universidad Autónoma de Barcelona, 2005. [Accessed 12 April 2021]. Available from:  
<https://www.tdx.cat/handle/10803/3214;jsessionid=521D8E91B7350B045BDE1C0F122A0D9A>
65. **ALLAWAY, W. H.** Overview of distribution patterns of trace elements in soils and plants. *Ann. N.Y. Acad. Sci.; (United States)* [online]. 1 January 1972. Vol. 199. [Accessed 28 May 2020]. DOI 10.1111/j.1749-6632.1972.tb46439. x. Available from:  
<https://www.osti.gov/biblio/6092648>Institution: Dept. of Agriculture, Ithaca, NY
66. **RIEUWERTS, J. S.; THORNTON, I.; FARAGO, M. E.; ASHMORE, M. R.** Factors influencing metal bioavailability in soils: preliminary investigations for the development of a critical loads approach for metals. *Chemical Speciation & Bioavailability.* 1 January 1998. Vol. 10, no. 2, p. 61–75. DOI 10.3184/095422998782775835.
67. **ROTH, E.; MANCIER, Valérie.** Adsorption of cadmium on different granulometric soil fractions: Influence of organic matter and temperature. *Geoderma.* 1 November 2012. Vol. 189–190, p. 133–143. DOI 10.1016/j.geoderma.2012.04.010.
68. **ISLAM, M. N.; DAS, B. K.; HUQUE, M. E.** Arsenic Accumulation in Common Vegetables from Irrigation. *Journal of Scientific Research.* 29 August 2012. Vol. 4, no. 3, p. 675–688. DOI 10.3329/jsr.v4i3.10494.
69. **CHARLES W., Martin.** Heavy metal trends in floodplain sediments and valley fill, River Lahn, Germany. *catena* [online]. 28 February 2000. Vol. 39, no. 1. [Accessed 17 November 2021]. DOI 10.1016/S0341-8162(99)00080-6. Available from:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0341816299000806>

70. **CARTAYA, Omar; REYNALDO, Inés; PENICHE, Carlos; GARRIDO, María.** Empleo de polímeros naturales como alternativa para la remediación de suelos contaminados por metales pesados. *Revista internacional de contaminación ambiental* [online]. 2010. Vol. 27, no. 1. [Accessed 9 March 2021]. Available from: [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0188-49992011000100004](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992011000100004)
71. **KABATA PENDIAS, Alina.** *Trace Elements in Soils and Plants* [online]. 4th. CRC Press, 2010. [Accessed 14 March 2021]. ISBN 978-1-4200-9370-4. Available from: <https://books.google.com.pe/books?id=YQfMBQAAQBAJ>
72. **ARIAS RODRÍGUEZ, Eladio; SUMOZA AGRAZ, Cándido; VALERA, Ángel; ZULENIA, María; TOVAR, Willians; GONZÁLEZ, Ramón.** *Caracterización de suelos - plantas - patógenos de la hacienda Evelio Páez. sector Guacara - estado Carabobo, Venezuela.* [online]. Venezuela, 2005. [Accessed 18 February 2021]. Available from: <https://www.researchgate.net/publication/326679570>
73. **KABATA PENDIAS, Alina; SADURSKI, Wieslaw.** Trace Elements and Compounds in Soil. In: *Elements and Their Compounds in the Environment* [online]. John Wiley & Sons, Ltd, 2004. p. 79–99. [Accessed 9 March 2021]. ISBN 978-3-527-61963-4. Available from: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9783527619634.ch5>
74. **SUBERO MATA, Neudis.** *Evaluación de las fracciones de fósforo y del contenido de cadmio en suelos ácidos fertilizados con fosfatos por largos periodos y su absorción por el arroz.* [online]. Venezuela: Universidad Central de Venezuela, 2013. [Accessed 25 April 2021]. Available from: <https://www.semanticscholar.org/paper/EVALUACION-C3%93N-DE-LAS-FRACCIONES-DE-F%3%93SFORO-Y-DEL-DE-EN-Mata-Valle/07af9ef93f3fb5d5d6c6af2ee608462c5f002a34>
75. **GALÁN HUERTOS, Emilio; ROMERO BAENA, Antonio J.** Contaminación de suelos por metales pesados. *Revista de la Sociedad Española de Mineralogía* [online]. 2008. No. 10. [Accessed 9 March 2021]. Available from: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6404529>

76. **KABATA PENDIAS, Alina.** *Trace elements in soils and plants* [online]. 3rd. Washington, DC: CRC Press, 2001. [Accessed 12 April 2021]. ISBN 978-0-8493-1575-6. Available from:  
<http://base.dnsgb.com.ua/files/book/Agriculture/Soil/Trace-Elements-in-Soils-and-Plants.pdf>
77. **PERIS MENDOZA, Mónica.** *Estudio de metales pesados en suelos bajo cultivos hortícolas de la provincia de Castellón* [online]. España: Universidad de Valencia, 2006. [Accessed 9 March 2021]. Available from:  
<https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/9504/%20peris.pdf;jsessionid=8EC182AB8C44DBA6778E1281A37F0472.tdx2?sequence=1>
78. **RÁBAGO JUAN-ARACIL, Isaura.** *Capacidad de amortiguación de la contaminación por plomo y por cadmio en suelos de la Comunidad de Madrid* [online]. Tesis Doctoral. Madrid: Universidad Complutense de Madrid, Servicio de Publicaciones, 2011. [Accessed 9 March 2021]. Available from:  
<https://eprints.ucm.es/id/eprint/12511/>
79. **SÁNCHEZ LEÓN, Elena; SARRIA VALDÉS, Karen.** *Papel del suelo en la toxicidad del cadmio* [online]. España, 2017. [Accessed 2 April 2021]. Available from:  
<https://eprints.ucm.es/id/eprint/56981/1/ELENA%20SANCHEZ%20LEON.pdf>
80. **MANJARREZ PABA, Ganiveth; CASTRO ANGULO, Ildefonso; UTRIA PADILLA, Leidys.** Bioacumulación de cadmio en ostras de la bahía de Cartagena. *Revista de Ingenierías: Universidad de Medellín* [online]. 2008. Vol. 7, no. 13. [Accessed 9 March 2021]. Available from:  
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4845713>
81. **SANDALIO, L. M.; DALURZO, H. C.; GÓMEZ, M.; ROMERO PUERTAS, M. C.; DEL RÍO, L. A.** Cadmium-induced changes in the growth and oxidative metabolism of pea plants. *Journal of Experimental Botany*. 1 November 2001. Vol. 52, no. 364, p. 2115–2126. DOI 10.1093/jexbot/52.364.2115.
82. **HERNÁNDEZ BARANDA, Yenisei; RODRÍGUEZ HERNÁNDEZ, Pedro; PEÑA ICART, Mirella; MERIÑO HERNÁNDEZ, Yanitza; CARTAYA RUBIO, Omar.** Toxicidad del Cadmio en las plantas y estrategias para disminuir sus efectos. Estudio de caso: El tomate. *Cultivos Tropicales*

[online]. September 2019. Vol. 40, no. 3. [Accessed 10 March 2021]. Available from:

[http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_abstract&pid=S0258-59362019000300010&lng=es&nrm=iso&tlng=es](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0258-59362019000300010&lng=es&nrm=iso&tlng=es)

83. **CLEMES, S.** Toxic metal accumulation, responses to exposure and mechanisms of tolerance in plants. *ScienceDirect* [online]. 2006. Vol. 88, no. 11. [Accessed 10 March 2021]. Available from:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0300908406001428>
84. **ENSTONE, Daryl E.; PETERSON, Carol A.; Fengshan, M. A.** Root endodermis and exodermis: structure, function, and responses to the environment. *Journal of Plant Growth Regulation*. 1 December 2002. Vol. 21, no. 4, p. 335–351. DOI 10.1007/s00344-003-0002-2.
85. **SONG, Yu; JIN, Liang; WANG, Xiaojuan.** Cadmium absorption and transportation pathways in plants. *International Journal of Phytoremediation*. 1 February 2017. Vol. 19, no. 2, p. 133–141. DOI 10.1080/15226514.2016.1207598.
86. **THOMINE, Sébastien; WANG, Rongchen; WARD, John M.; CRAWFORD, Nigel M.; SCHROEDER, Julian I.** Cadmium and iron transport by members of a plant metal transporter family in Arabidopsis with homology to Nramp genes. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 25 April 2000. Vol. 97, no. 9, p. 4991–4996. DOI 10.1073/pnas.97.9.4991.
87. **TAKAHASHI, Ryuichi; ISHIMARU, Yasuhiro; SHIMO, Hugo; OGO, Yuko; SENOURA, Takeshi; NISHIZAWA, Naoko K.; NAKANISHI, Hiromi.** The OsHMA2 transporter is involved in root to shoot translocation of Zn and Cd in rice. *Plant, Cell & Environment*. 2012. Vol. 35, no. 11, p. 1948–1957. DOI <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2012.02527.x>.
88. **GAO, Lei; CHANG, Jiadong; CHEN, Ruijie; LI, Hubo; LU, Hongfei; TAO, Longxing; XIONG, Jie.** Comparison on cellular mechanisms of iron and cadmium accumulation in rice: prospects for cultivating Fe rich but Cd free rice. *Rice*. December 2016. Vol. 9, no. 1, p. 39. DOI 10.1186/s12284-016-0112-7.
89. **PARK, Sunghun; CHENG, Ning Hui; PITTMAN, Jon K.; YOO, Kil Sun; PARK, Jungeun; SMITH, Roberta H.; HIRSCHI, Kendal D.** Increased calcium levels and prolonged shelf life in tomatoes expressing arabidopsis

- H<sup>+</sup>/Ca<sup>2+</sup> transporters. *Plant Physiology*. 1 November 2005. Vol. 139, no. 3, p. 1194–1206. DOI 10.1104/pp.105.066266.
90. **AKHTER, Fardausi; OMELON, Christopher R.; GORDON, Robert A.; MOSER, Desmond; MACFIE, Sheila M.** Localization and chemical speciation of cadmium in the roots of barley and lettuce. *Environmental and Experimental Botany*. 1 April 2014. Vol. 100, p. 10–19. DOI 10.1016/j.envexpbot.2013.12.005.
91. **VERBRUGGEN, Nathalie; HERMANS, Christian; SCHAT, Henk.** Mechanisms to cope with arsenic or cadmium excess in plants. *Current Opinion in Plant Biology*. 1 June 2009. Vol. 12, no. 3, p. 364–372. DOI 10.1016/j.pbi.2009.05.001.
92. **NOCITO, Fabio Francesco; LANCILLI, Clarissa; DENDENA, Bianca; LUCCHINI, Giorgio; SACCHI, Gian Attilio.** Cadmium retention in rice roots is influenced by cadmium availability, chelation and translocation. *Plant, Cell & Environment*. 2011. Vol. 34, no. 6, p. 994–1008. DOI <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2011.02299.x>.
93. **MENDOZA CÓZATL, David G.; BUTKO, Emerald; SPRINGER, Franziska; TORPEY, Justin W.; KOMIVES, Elizabeth A.; KEHR, Julia; SCHROEDER, Julian I.** Identification of high levels of phytochelatins, glutathione and cadmium in the phloem sap of *Brassica napus*. A role for thiol-peptides in the long-distance transport of cadmium and the effect of cadmium on iron translocation. *The Plant Journal*. 2008. Vol. 54, no. 2, p. 249–259. DOI <https://doi.org/10.1111/j.1365-313X.2008.03410.x>.
94. **MARUTHI, B. B.; DIEHL, S. V.; HAN, F. X.; MONTS, D. L.; SU, Y.** Anatomical changes due to uptake and accumulation of Zn and Cd in Indian mustard (*Brassica juncea*). *Environmental and Experimental Botany*. 1 September 2005. Vol. 54, no. 2, p. 131–141. DOI 10.1016/j.envexpbot.2004.06.011.
95. **VELASCO TREJO, Juan Antonio.** *Tecnologías de remediación para suelos contaminados* [online]. Instituto Nacional de Ecología, 2002. [Accessed 25 March 2021]. ISBN 978-968-817-557-6. Available from: <https://books.google.com.pe/books?id=mj9rVESchHCcC>

96. **Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático.** Tecnologías de Remediación para suelos contaminados por EPT. *INECC* [online]. 2007. [Accessed 9 March 2021]. Available from:  
<http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/459/cap4.html>
97. **LOVLEY, Derek R.; COATES, John D.** Bioremediation of metal contamination. *Current Opinion in Biotechnology*. 1 June 1997. Vol. 8, no. 3, p. 285–289. DOI 10.1016/S0958-1669(97)80005-5.
98. **DIELS, L.; VAN DER LELIE, N.; BASTIAENS, L.** New developments in treatment of heavy metal contaminated soils. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*. 1 March 2002. Vol. 1, no. 1, p. 75–82. DOI 10.1023/A:1015188708612.
99. **LÓPEZ MARTÍNEZ, Sugey; GALLEGOS MARTÍNEZ, Margarita E.; PÉREZFLORES, Laura J.; GUTIÉRREZ ROJAS, Mariano.** Mecanismos de fitorremediación de suelos contaminados con moléculas orgánicas xenobióticas. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* [online]. 2005. [Accessed 12 April 2021]. Available from:  
<https://www.revistascca.unam.mx/rica/index.php/rica/article/view/22565>
100. **Fundación de Chile.** *Manual de tecnologías de remediación de sitios contaminados*. [online]. 2019. [Accessed 9 March 2021]. Available from:  
[https://fch.cl/wp-content/uploads/2019/10/manual-de-tecnologias-de-remediacion-de-sitios-contaminados\\_baja-1.pdf](https://fch.cl/wp-content/uploads/2019/10/manual-de-tecnologias-de-remediacion-de-sitios-contaminados_baja-1.pdf)
101. **ESCOBAR MISAHUAMÁN, Alexander Jhonson; OCAS IZQUIERDO, Segundo Martin.** *Electrorremediación en función de la densidad de corriente y la concentración de ácido acético, como alternativa para la disminución de plomo en relaves mineros - Mina Paredones, Cajamarca, 2016* [online]. Cajamarca - Perú: Universidad Privada del Norte, 2016. [Accessed 24 March 2021]. Available from:  
<https://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/10682>
102. **MARRERO COTO, Jeannette; AMORES SÁNCHEZ, Isis; COTO PÉREZ, Orquídea.** Fitorremediación, una tecnología que involucra a plantas y microorganismos en el saneamiento ambiental. *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar* [online]. 2012. [Accessed 9 March 2021]. Available from: <https://www.redalyc.org/pdf/2231/223124988007.pdf>

103. **PAREDES PÁLIZ, Karina Inés.** *Fitoestabilización de metales pesados en sedimentos costeros asistida por bacterias rizosféricas.* [online]. Tesis Doctoral. Sevilla: Universidad de Sevilla, 2017. [Accessed 16 April 2021]. Available from: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=115658>
104. **MELIGNANI, Eliana.** *Pautas para la remediación y recuperación de áreas sujetas a contaminación mixta de cuencas urbanas y periurbanas de llanura* [online]. Tesis Doctoral. Argentina: Universidad de Buenos Aires, 2017. [Accessed 5 March 2021]. Available from: [https://bibliotecadigital.exactas.uba.ar/download/tesis/tesis\\_n6192\\_Melignani.pdf](https://bibliotecadigital.exactas.uba.ar/download/tesis/tesis_n6192_Melignani.pdf)
105. **BERNAL FIGUEROA, Andrea Angélica.** Fitorremediación en la recuperación de suelos: una visión general. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental* [online]. 2014. Vol. 5, no. 2. [Accessed 8 March 2021]. Available from: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5590911>
106. **BAYÓN SANZ, Sara.** *Aplicación de la fitorremediación a suelos contaminados por metales pesados.* [online]. Universidad Complutense, 2015. [Accessed 25 February 2021]. Available from: <http://147.96.70.122/Web/TFG/TFG/Memoria/BAY%C3%93N%20SANZ,%20SARA.pdf>
107. **ARTHUR, Ellen L.; RICE, Pamela J.; RICE, Patricia J.; ANDERSON, Todd A.; BALADI, Sadika M.; HENDERSON, Keri L. D.; COATS, Joel R.** Phytoremediation: An Overview. *Critical Reviews in Plant Sciences*. 1 March 2005. Vol. 24, no. 2, p. 109–122. DOI 10.1080/07352680590952496.
108. **LORESTANI, B.; CHERAGHI, Mehrdad; YUOSEFI, N.** Phytoremediation Potential of Native Plants Growing on a Heavy Metals Contaminated Soil of Copper Mine in Iran. *World Academy of Science, Engineering and Technology* [online]. 1 May 2011. Vol. 77. [Accessed 30 March 2021]. Available from: <https://publications.waset.org/2296/phytoremediation-potential-of-native-plants-growing-on-a-heavy-metals-contaminated-soil-of-copper-mine-in-iran>
109. **YOON, Joonki; CAO, Xinde; ZHOU, Qixing; Lena Q.** Accumulation of Pb, Cu, and Zn in native plants growing on a contaminated Florida site. *Science*

- of *The Total Environment*. 15 September 2006. Vol. 368, no. 2, p. 456–464. DOI 10.1016/j.scitotenv.2006.01.016.
110. **VYSLOUŽILOVÁ, M.; TLUSTOŠ, P.; SZÁKOVÁ, J.; PAVLÍKOVÁ, D.** As, Cd, Pb and Zn uptake by *Salix* spp. clones grown in soils enriched by high loads of these elements. *Plant, Soil and Environment*. 2003. Vol. 49, no. No. 5, p. 191–196. DOI 10.17221/4112-PSE.
111. **OÑATE ZÚÑIGA, Lisette Anabel.** *Duración de las etapas fenológicas y profundidad radicular del cultivo de maíz (Zea mays) var. Blanco harinoso criollo, bajo las condiciones climáticas del cantón Cevallos.* [online]. Ecuador: Universidad Técnica de Ambato, 2016. [Accessed 28 April 2021]. Available from:  
<https://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/18305>
112. **MOJIRI, Amin.** The Potential of Corn (*Zea mays*) for Phytoremediation of Soil Contaminated with Cadmium and Lead. *Journal of Biological & Environmental Sciences* [online]. 1 January 2011. Vol. 5. [Accessed 2 April 2021]. Available from:  
<https://www.researchgate.net/publication/225285964>
113. **QUAN YING, Cai; CE HUI, Mo; QI TANG, Wu; QIAO YUN, Zeng; KATSOYIANNIS, Athanasios.** Concentration and speciation of heavy metals in six different sewage sludge-composts. *Journal of Hazardous Materials*. 25 August 2007. Vol. 147, no. 3, p. 1063–1072. DOI 10.1016/j.jhazmat.2007.01.142.
114. **ALIYU, H. G.; ADAMU, H. M.** The potential of maize as phytoremediation tool of heavy metals. *European Scientific* [online]. 2014. [Accessed 25 March 2021]. Available from:  
<https://core.ac.uk/download/pdf/236406354.pdf>
115. **FLORIJN, P. J.; VAN BEUSICHEM, M. L.** Cadmium distribution in maize inbred lines: Effects of pH and level of Cd supply. *Plant and Soil*. 1 June 1993. Vol. 153, no. 1, p. 79–84. DOI 10.1007/BF00010546.
116. **MUSO CACHUMBA, Jorge Javier.** *Determinación de la capacidad fitorremediadora de cadmio del camacho (Xanthosoma undipes Koch) especie vegetal nativa en el área de influencia de EP Petroecuador en el distrito Amazónico.* [online]. Ecuador: Escuela Politécnica del Ejército, 2012. [Accessed 22 March 2021]. Available from:

<http://repositorio.espe.edu.ec/xmlui/handle/21000/6255>

117. **AZIZIAN, A.; AMIN, S.; NOSHADI, M.; MAFTOUN, M.; EMAM, Y.** Phytoremediation Potential of Corn and Oat for Increased Levels of Soil Cadmium under Different Irrigation Intervals. *Iran Agricultural Research*. 2011. P. 14. DOI 10.22099/IAR.2012.493.
118. **RODRÍQUEZ SERRANO, M.; MARTÍNEZ DE LA CASA, N.; ROMERO PUERTAS, M. C.; DEL RIO, L. A.; SANDALIO, L. M.** Toxicidad del Cadmio en Plantas. *Ecosistemas* [online]. 2008. [Accessed 31 March 2021]. Available from: <https://core.ac.uk/download/pdf/16362081.pdf>
119. **FLORES BRICEÑO, Ranulfo.** Efectos adversos de metales pesados en la agricultura de la cuenca baja del río Huaura-provincia Huaura 2017. *Ciencia y Tecnología* [online]. 2018. Vol. 14, no. 4. [Accessed 20 April 2021]. Available from:  
<https://revistas.unitru.edu.pe/index.php/PGM/article/view/2168>
120. **TEJADA, M.; GARCÍA, C.; GONZÁLEZ, J. L.; HERNÁNDEZ, M. T.** Use of organic amendment as a strategy for saline soil remediation: Influence on the physical, chemical and biological properties of soil. *Soil Biology and Biochemistry*. 1 June 2006. Vol. 38, no. 6, p. 1413–1421. DOI 10.1016/j.soilbio.2005.10.017.
121. **ADRIANO, D. C.; WENZEL, W. W.; VANGRONVELD, J.; BOLAN, N. S.** Role of assisted natural remediation in environmental cleanup. *Geoderma*. 1 October 2004. Vol. 122, no. 2, p. 121–142. DOI 10.1016/j.geoderma.2004.01.003.
122. **CARRILLO GONZÁLEZ, R.; PEREA VÉLEZ, Y. S.; GONZÁLEZ CHÁVEZ, M. C. A.** Fitorremediación asistida con enmiendas y fitoestabilización de elementos potencialmente tóxicos. *Productividad* [online]. 2017. Vol. 10, no. 4. [Accessed 1 May 2021]. Available from:  
<https://revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/990>
123. **ARCO LÁZARO, Elena.** *Implicación de enmiendas orgánicas e inorgánicas en la adsorción y biodisponibilidad de elementos traza en suelos*. [online]. España: Universidad de Murcia, 2017. [Accessed 30 April 2021]. Available from: <https://www.tesisenred.net/handle/10803/404825>

124. **VANGRONSVELD, Jaco; HERZIG, Rolf; WEYENS, Nele; BOULET, Jana; ADRIAENSEN, Kristin; RUTTENS, Ann; THEWYS, Theo; VASSILEV, Andon; MEERS, Erik; NEHNEVAJOVA, Erika; VAN DER LELIE, Daniel; MENCH, Michel.** Phytoremediation of contaminated soils and groundwater: lessons from the field. *Environmental Science and Pollution Research*. 1 November 2009. Vol. 16, no. 7, p. 765–794. DOI 10.1007/s11356-009-0213-6.
125. **MAGDOFF, Fred WEIL, Ray R.** *Soil Organic Matter in Sustainable Agriculture* [online]. CRC Press, 2004. [Accessed 28 April 2021]. ISBN 978-0-203-49637-4. Available from: <https://books.google.com.pe/books?id=djZpKk4k8HoC>
126. **KIM, Tan.** *Principles of Soil Chemistry* [online]. 4th. CRC Press, 2010. [Accessed 5 May 2021]. ISBN 978-1-4398-9460-6. Available from: <https://books.google.com.pe/books?id=QUDOBQAAQBAJ>
127. **STEVENSON, F. J.** *Humus Chemistry: Genesis, Composition, Reactions* [online]. John Wiley & Sons, 1994. [Accessed 25 April 2021]. ISBN 978-0-471-59474-1. Available from: [https://books.google.com.pe/books?id=7kCQch\\_YKoMC](https://books.google.com.pe/books?id=7kCQch_YKoMC)
128. **GOMERO OSORIO, Luis; VELÁSQUEZ ALCÁNTARA, Héctor.** *Manejo ecológico de suelos*. [online]. 1. Lima - Perú, 1999. [Accessed 9 March 2021]. Available from: <https://www.midagri.gob.pe/portal/download/pdf/ais-2015/manejo-ecol-suelo-raaa.pdf>
129. **NYLE C., Brady; RAY R., Weil.** *The Nature and Properties of Soils* [online]. 2016. [Accessed 2 May 2021]. ISBN 978-0-13-227939-0. Available from: [https://journals.lww.com/soilsci/Citation/1952/10000/The\\_Nature\\_and\\_Properties\\_of\\_Soils.18.aspx](https://journals.lww.com/soilsci/Citation/1952/10000/The_Nature_and_Properties_of_Soils.18.aspx)
130. **GIKAS, Petros; ROMANOS, Pavlos.** Effects of tri-valent (Cr (III)) and hexa-valent (Cr(VI)) chromium on the growth of activated sludge. *Journal of hazardous materials*. 1 June 2006. Vol. 133, p. 212–7. DOI 10.1016/j.jhazmat.2005.10.023.
131. **KHWAIRAKPAM, Meena; BHARGAVA, Renu.** Vermitechnology for sewage sludge recycling. *Journal of Hazardous Materials*. 30 January 2009. Vol. 161, no. 2, p. 948–954. DOI 10.1016/j.jhazmat.2008.04.088.

132. **SAAVEDRA GONZÁLEZ, Manuel.** *Biodegradación de alperujo utilizando hongos del género pleorotus y anélidos de la especie Eisenia Foetida.* [online]. Tesis Doctoral. Granada: Universidad de Granada, 2007. [Accessed 18 April 2021]. Available from: <https://digibug.ugr.es/handle/10481/1453>
133. **HÖCKNER, M.; DALLINGER, R.; STÜRZENBAUM, S. R.** Metallothionein gene activation in the earthworm (*Lumbricus rubellus*). *Biochemical and Biophysical Research Communications*. 8 May 2015. Vol. 460, no. 3, p. 537–542. DOI 10.1016/j.bbrc.2015.03.065.
134. **SAHARIAH, Banashree; GOSWAMI, Linee; KI HYUN, Kim; BHATTACHARYYA, Pradip; BHATTACHARYYA, Satya Sundar.** Metal remediation and biodegradation potential of earthworm species on municipal solid waste: A parallel analysis between *Metaphire posthuma* and *Eisenia fetida*. *Bioresource Technology*. 1 March 2015. Vol. 180, p. 230–236. DOI 10.1016/j.biortech.2014.12.062.
135. **SEREGIN, I. V.; SHPIGUN, L. K.; IVANOV, V. B.** Distribution and Toxic effects of cadmium and lead on maize roots. *Russian Journal of Plant Physiology*. 1 July 2004. Vol. 51, no. 4, p. 525–533. DOI 10.1023/B: RUPP.0000035747.42399.84.
136. **ÁLVAREZ DE LA PUENTE, José María.** *Manual de compostaje para Agricultura Ecológica* [online]. 2010. [Accessed 17 March 2021]. Available from: <https://www.researchgate.net/publication/311789650>
137. **ROMÁN, Pilar; MARTÍNEZ, María M.; PANTOJA, Alberto.** *Manual de compostaje del agricultor.* [online]. 2013. [Accessed 9 March 2021]. Available from: <http://www.fao.org/3/i3388s/i3388s.pdf>
138. **SAEZ OLIVARES, Andrés.** *Optimización de los métodos para mejorar la calidad del compost de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos* [online]. Tesis Doctoral. España: E. T. S. I. Caminos, Canales y Puertos (UPM), 2000. [Accessed 10 March 2021]. Available from: <http://oa.upm.es/613/>
139. **DELGADO MORENO, Laura; PEÑA, Aránzazu.** Compost and vermicompost of olive cake to bioremediate triazines-contaminated soil. *Science of The Total Environment*. 15 February 2009. Vol. 407, no. 5, p. 1489–1495. DOI 10.1016/j.scitotenv.2008.10.047.

140. **LAICH, Federico.** El papel de los microorganismos en el proceso de compostaje. *Fertilidad y Calidad del Suelo* [online]. 2011. [Accessed 10 March 2021]. Available from:  
<https://www.icia.es/biomusa/pt/jornadas-y-actividades/jornada-tecnica-sobre-calidad-y-fertilidad-del-suelo/65-el-papel-de-los-microorganismos-en-el-proceso-de-compostaje/file>
141. **Estado Peruano.** *Constitución política del Perú del año 1993* [online]. Lima-Perú, 1993. [Accessed 14 March 2021]. Available from:  
<http://revistas.ucsp.edu.pe/index.php/Allpanchis/article/view/570>
142. \_\_\_\_\_. *Ley General del Ambiente N.º 28611*. Lima-Perú, 2005.
143. \_\_\_\_\_. *Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para suelo* [online]. Lima-Perú, 2017. [Accessed 14 March 2021]. Available from:  
<https://sinia.minam.gob.pe/normas/aprueban-estandares-calidad-ambiental-eca-suelo-0>
144. **Ministerio del Ambiente.** *Guía para muestreo de suelos*. Perú: Minam, 2014.
145. **LOZANO RIVAS, William Antonio.** *Suelos: guía de prácticas simplificadas en campo y laboratorio* [online]. Colombia, 2016. [Accessed 3 June 2021]. ISBN 978-958-8957-59-3. Available from:  
<https://www.digitaliapublishing.com/a/52128/suelos--guia-de-practicas-simplificadas-en-campo-y-laboratorio>
146. **DÍEZ LÁZARO, Javier.** *Fitocorrección de suelos contaminados con metales pesados: evaluación de plantas tolerantes y optimización del proceso mediante prácticas agronómicas* [online]. Tesis Doctoral. España: Universidade de Santiago de Compostela, 2008. [Accessed 5 March 2021]. Available from: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=108117>
147. **RAMÍREZ, Augusto.** Toxicología del cadmio. Conceptos actuales para evaluar exposición ambiental u ocupacional con indicadores biológicos. *Anales de la Facultad de Medicina*. 18 March 2002. Vol. 63, no. 1, p. 51–64. DOI 10.15381/anales.v63i1.1477.
148. **REPETTO JIMÉNEZ, Manuel; REPETTO KHUN, Guillermo.** *Toxicología fundamental*. [online]. 4. Ediciones Díaz de Santos, 2009. [Accessed 11 May 2021]. ISBN 978-84-9052-306-3. Available from:

<https://books.google.com.pe/books?hl=es&lr=&id=tncZEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR19&dq=Toxicolog%C3%ADa+fundamental.&ots=8xFKM5ImWb&sig=5xoasx6UddG-QsZbNZ1KyUVNKyk#v=onepage&q=Toxicolog%C3%ADa%20fundamental.&f=false>

149. **Ministerio del Ambiente.** *Glosario de términos, sitios contaminados* [online]. 2016. [Accessed 28 May 2020]. Available from: <http://www.minam.gob.pe/calidadambiental/wp-content/uploads/sites/22/2015/02/2016-05-30-Conceptos-propuesta-Glosario.pdf>
150. **Glosario de riego.** [online]. [Accessed 13 March 2021]. Available from: <https://www.riego.org/glosario/absorcion/>
151. **RODRÍGUEZ ROMERO, Juan Francisco.** *Eliminación de metales alcalinos de polioles mediante intercambio iónico* [ [online]. Univ de Castilla La Mancha, 1995. [Accessed 23 May 2021]. ISBN 978-84-88255-73-0. Available from: [https://books.google.com.pe/books/about/Eliminaci%C3%B3n\\_de\\_metale\\_s\\_alcalinos\\_de\\_pol.html?id=-nZfgSZSShQC&redir\\_esc=y](https://books.google.com.pe/books/about/Eliminaci%C3%B3n_de_metale_s_alcalinos_de_pol.html?id=-nZfgSZSShQC&redir_esc=y)
152. **SOSA, Nicolas; GAMBAUDO, Sebastian; FONTANETTO, Hugo; KELLER, Oscar.** Aplicación de enmienda orgánica en un cultivo de maíz. *Miscelánea* [online]. 2010. [Accessed 23 July 2021]. Available from: [http://rafaela.inta.gob.ar/info/documentos/miscelaneas/118/misc118\\_p125.pdf](http://rafaela.inta.gob.ar/info/documentos/miscelaneas/118/misc118_p125.pdf)
153. **ALONSO PEÑA, José Ramón.** *Cómo hacer compost* [online]. Ediciones Nobel, S. A, 2011. [Accessed 8 March 2021]. ISBN 978-84-8476-430-4. Available from: <https://books.google.com.fj/books?id=Zx0jXU7aGfUC&printsec=copyright#v=onepage&q&f=false>
154. **Red Española de Compostaje.** *Uso del compost como componente de sustratos para cultivo en contenedor III.2* [online]. Mundiprensa, 2015. [Accessed 3 March 2021]. ISBN 978-84-8476-709-1. Available from: <https://www.mundiprensa.com//catalogo/9788484767091/uso-del-compost-como-componente-de-sustratos-para-cultivo-en-contenedor-iii-2>

155. **DANIEL CORIA, Ignacio.** Remediación de suelos contaminados con hidrocarburos. *Ingeniería y Gerenciamiento ambiental* [online]. 2007. [Accessed 26 July 2021]. Available from:  
<https://www.sustentabilidad.uai.edu.ar/pdf/ing/uais-iga-600-001%20-%20remediacion.pdf>
156. **SÁNCHEZ ORTEGA, Iván.** Maíz I (Zea mays). *Reduca* [online]. 2014. [Accessed 5 March 2021]. Available from:  
<https://eprints.ucm.es/id/eprint/27974/>
157. **STECIOW, Mónica.** Rizósfera. [online]. [Accessed 14 March 2021]. Available from:  
<https://www.mendoza.conicet.gov.ar/portal/enciclopedia/terminos/Rizosfera.htm>
158. **ORTIZ BERNAD, Irene; SANZ GARCÍA, Juana; DORADO VALIÑO, Miriam; VILLAR FERNÁNDEZ, Susana.** *Técnicas de recuperación de suelos contaminados* [online]. España, 2007. [Accessed 19 August 2021]. Available from: <http://www.madrid.org/bvirtual/BVCM001700.pdf>
159. **INFOJARDIN.** Infojardin.net. [online]. [Accessed 14 March 2021]. Available from: <https://www.infojardin.com/glosario/tobera/translocacion.htm>
160. **OTZEN, Tamara; MANTEROLA, Carlos; RODRÍGUEZ NÚÑEZ, Iván; GARCÍA DOMÍNGUEZ, Maricela.** La necesidad de aplicar el método científico en investigación clínica: problemas, beneficios y factibilidad del desarrollo de protocolos de investigación. *International Journal of Morphology*. September 2017. Vol. 35, no. 3, p. 1031–1036. DOI 10.4067/S0717-95022017000300035.
161. **HERNÁNDEZ ESCOBAR, Arturo Andrés; RAMOS RODRÍGUEZ, Marcos Pedro; PLACENCIA LÓPEZ, Barbara Miladys; INDACOCHEA GANCHOZO, Blanca; QUIMIS GÓMEZ, Alex Joffre; MORENO PONCE, Luis Alfonso.** *Metodología de la investigación científica* [online]. 1 ed. Ciencias, 2018. [Accessed 29 April 2021]. ISBN 978-84-948257-0-5. Available from:  
<https://books.google.com.pe/books?id=y3NKDwAAQBAJ&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false>
162. **ARIAS, Fidias.** *El proyecto de investigación* [online]. 6 ta. Venezuela, 2006. [Accessed 25 July 2021]. Available from:

[https://books.google.com.pe/books?hl=es&lr=&id=W5n0BgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA11&ots=kYIObqxrh2&sig=lfEV56kTYTV4dldL0wz86pFNTXU&redir\\_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.pe/books?hl=es&lr=&id=W5n0BgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA11&ots=kYIObqxrh2&sig=lfEV56kTYTV4dldL0wz86pFNTXU&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false)

163. **BONO CABRÉ, Roser.** *Diseños cuasiexperimentales y longitudinales* [online]. España, 2012. [Accessed 5 November 2021]. Available from: <http://diposit.ub.edu/dspace/handle/2445/30783>
164. **RUBIO HURTADO, María José; BERLANGA SILVENTE, Vanesa.** Como aplicar las pruebas paramétricas binarias t de Student y ANOVA en SPSS. *Revista d'Innovació i Recerca en Educació* [online]. 19 April 2012. [Accessed 2 September 2021]. Available from: <https://docplayer.es/12000262-Como-aplicar-las-pruebas-parametricas-bivariadas-t-de-student-y-anova-en-spss-caso-practico.html>
165. **BAKIERA, M.; GONZÁLEZ SUNCH, J.; JORNET, J.** *SPSS: ANOVA de un factor.* [online]. 2015. [Accessed 20 June 2021]. Available from: [https://www.uv.es/innomide/spss/SPSS/SPSS\\_0702b.pdf](https://www.uv.es/innomide/spss/SPSS/SPSS_0702b.pdf)
166. **GALLEGO SERRANO, Roque.** *Introducción al análisis de datos experimentales: tratamiento de datos en bioensayos.* [online]. Publicacions de la Universitat Jaume I, 2003. [Accessed 25 May 2021]. ISBN 978-84-8021-429-2. Available from: <https://books.google.com.pe/books?id=NLUVJTK7EIoC>
167. **FALLAS, Jorge.** *Análisis de varianza* [online]. 2012. [Accessed 26 July 2021]. Available from: [https://www.ucipfg.com/Repositorio/MGAP/MGAP-05/BLOQUE-ACADEMICO/Unidad-2/complementarias/analisis\\_de\\_varianza\\_2012.pdf](https://www.ucipfg.com/Repositorio/MGAP/MGAP-05/BLOQUE-ACADEMICO/Unidad-2/complementarias/analisis_de_varianza_2012.pdf)
168. **SABADÍAS VARGAS, Antonio.** *Estadística descriptiva e inferencial* [online]. Universidad de Castilla La Mancha, 1995. [Accessed 25 July 2021]. ISBN 978-84-88255-87-7. Available from: <https://books.google.com.pe/books?id=RbaC-wPWqjsC>
169. **TAUCHER, Erica.** *Bioestadística.* [online]. Editorial Universitaria, 1997. [Accessed 2 August 2021]. ISBN 978-956-11-1310-7. Available from: <https://books.google.com.pe/books?id=loMan8LibZgC>
170. **ACOSTA, Yudith; ZUAHRE, Maziad El; REYES, Nicolás; GARCÍA, Hendrina; MORALES, Carlos.** Metales pesados en un suelo afectado con

aceite proveniente de motores de combustión interna. *Multiciencias* [online]. 2011. Vol. 11. [Accessed 26 May 2021]. Available from:  
<https://www.redalyc.org/pdf/904/90418851004.pdf>

171. **BINNER, Erwin, MÉNDEZ QUINCHO, Leonor C.; MIYASHIRO KIYAN, Víctor Raúl.** *Gestión de residuos sólidos municipales en el Perú y Austria* [online]. Lima: Fondo editorial-UNALM, 2016. [Accessed 12 October 2021]. ISBN 978-612-4147-53-1. Available from:  
<https://shopstar.pe/gestion-de-residuos-solidos-municipales-en-el-peru-y-en-austria-38/p>

## **ANEXO**

## Anexo 1

### Guía de la interpretación de análisis de suelos

#### 1. Textura del suelo<sup>1</sup>

Grupo textural	Clase textural
<b>Gruesa</b>	Arena
	Arena franca
<b>Moderadamente gruesa</b>	Franco arenoso
<b>Media</b>	Franco
	Franco limoso
	Limoso
<b>Moderadamente fina</b>	Franco arcilloso
	Franco arcilloso limoso
	Franco arcilloso arenoso
<b>Fina</b>	Arcillo arenoso
	Arcillo limoso
	Arcilloso

#### 2. Reacción del suelo (pH)<sup>1</sup>

Rangos	Clases
<3,5	Ultra ácido
3,6 – 4,4	Extremadamente ácido
4,5 – 5,0	Muy fuertemente ácido
5,1 – 5,5	Fuertemente ácido
5,6 – 6,0	Moderadamente ácido
6,1 – 6,5	Ligeramente ácido
6,6 – 7,3	Neutro
7,4 – 7,8	Ligeramente alcalino
7,9 – 8,4	Moderadamente alcalino
8,5 – 9,0	Fuertemente alcalino
>9,0	Muy fuertemente alcalino

#### 3. Materia orgánica

Nivel	Materia orgánica (%)
Bajo	<2
Medio	2 a 4
Alto	>4

#### 4. Fosforo disponible<sup>1</sup>

Nivel	P disponible (mg/kg)
Bajo	<7
Medio	7 a 14
Alto	>14

5. Potasio disponible<sup>1</sup>

Nivel	K disponible (mg/kg)
Bajo	<100
Medio	100 a 240
Alto	>240

6. Carbonato de calcio<sup>2</sup>

Nivel	CaCO <sub>3</sub> (%)
Bajo	<1
Medio	1 - 5
Alto	5 - 15
Muy Alto	>15

7. Capacidad de intercambio catiónico (CIC)<sup>2</sup>

Nivel	CIC (cmol/kg)
Muy baja	< 4
Moderadamente baja	4 – 8
Baja	8 – 12
Moderadamente alta	12 – 20
Alta	> 20

8. Conductividad eléctrica<sup>2</sup>

Calificación	Conductividad eléctrica dS/m
No salino	0 – 2
Muy ligeramente salino	2 – 4
Ligeramente salino	4 – 8
Moderadamente salino	8 – 16
Fuertemente salino	> 16

9. Saturación de bases<sup>2</sup>

Nivel	Suma de cationes (%)	Acetato de amonio (%)
Bajo	< 35	< 50
Alto	> 35	> 50

## 10. Fertilidad del suelo<sup>2</sup>

### Descripción

Fertilidad alta: todos los contenidos de materia orgánica, nitrógeno, fósforo y potasio son altos.

Fertilidad media: cuando alguno de los contenidos de materia orgánica, nitrógeno, fósforo o potasio es medio, los demás son altos.

Fertilidad baja: cuando algunos de los contenidos de materia orgánica, nitrógeno, fósforo y potasio es bajo.

Nivel	Materia Orgánica (%)	Fosforo Disponible (ppm)	Potasio Disponible (ppm)
Bajo	< 2	> 7	< 100
Medio	2 – 4	7 – 14	100 – 240
Alto	> 4	> 14	> 240

<sup>1</sup> MINAGRI-DGAAA. (2009). Reglamento de clasificación de tierras según su capacidad de uso mayor. Lima, Perú.

<sup>2</sup> Departamento de suelos y fertilizantes de la Universidad Nacional Agraria La Molina, 2002.

## Anexo 2

### Escala de interpretación de cadmio en enmiendas orgánicas

Parámetro	Calidad de acuerdo al uso		
	Calidad A+	Calidad A	Calidad B
Cd (mg/kg)	0,7	1,0	3,0

Calidad A+: Uso en la agricultura orgánica o en la agricultura en general.

Calidad A: Uso en la agricultura orgánica en general

Calidad B: No uso en la agricultura.

**Anexo 3**  
**Panel fotográfico**



**Figura 13. Muestreo del suelo agrícola del Distrito de Leonor Ordoñez-Jauja**



**Figura 14. Pesado del vermicompost de acuerdo a las dosis (5%=150g; 10%=300g; 20%=600g).**



**Figura 15. Pesado del compost de acuerdo a las dosis (5%=150g; 10%=300g; 20%=600g).**



**Figura 16. Inicio de la germinación de las semillas de maíz variedad San Gerónimo.**



**Figura 17. Germinación de semillas, a los 5 días.**



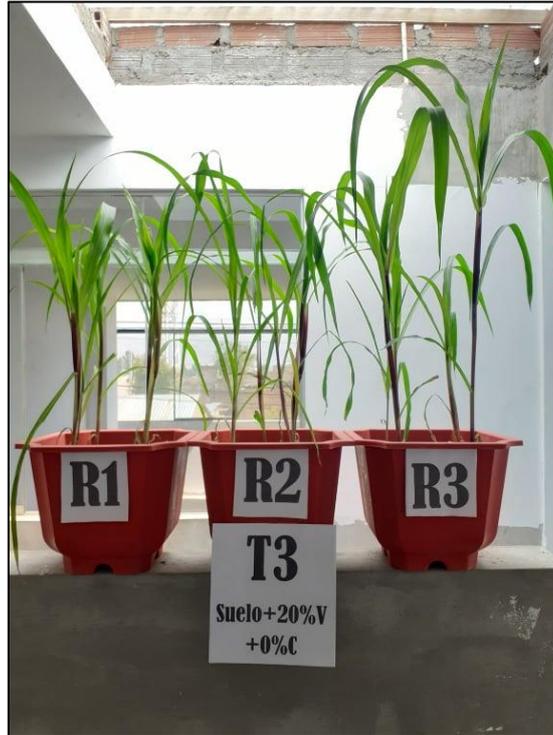
**Figura 18. Cultivo del maíz, a 45 días desde el sembrado.**



**Figura 19. Cultivo de maíz con 60 días, correspondiente al tratamiento 1 con sus 3 repeticiones.**



**Figura 20. Cultivo de maíz con 60 días, correspondiente al tratamiento 2 con sus 3 repeticiones.**



**Figura 21. Cultivo de maíz con 60 días, correspondiente al tratamiento 3 con sus 3 repeticiones.**



**Figura 22. Cultivo de maíz con 60 días, correspondiente al tratamiento 4 con sus 3 repeticiones.**



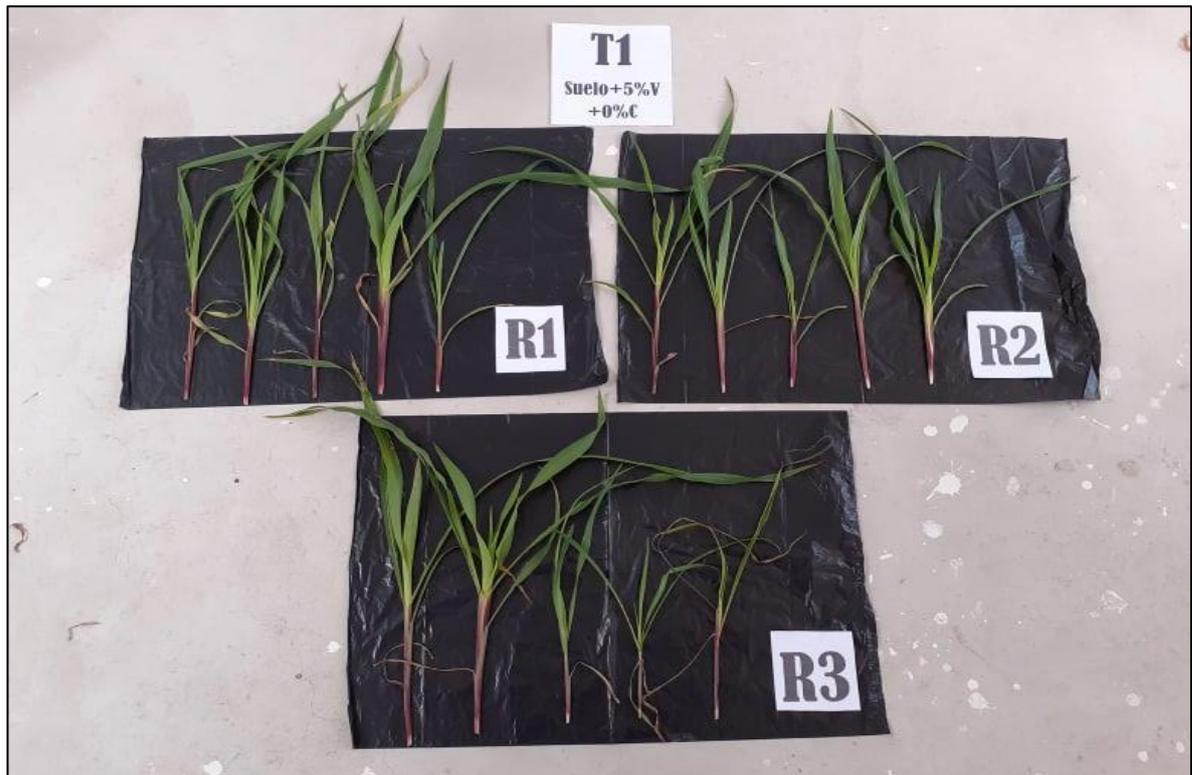
**Figura 23. Cultivo de maíz con 60 días, correspondiente al tratamiento 5 con sus 3 repeticiones.**



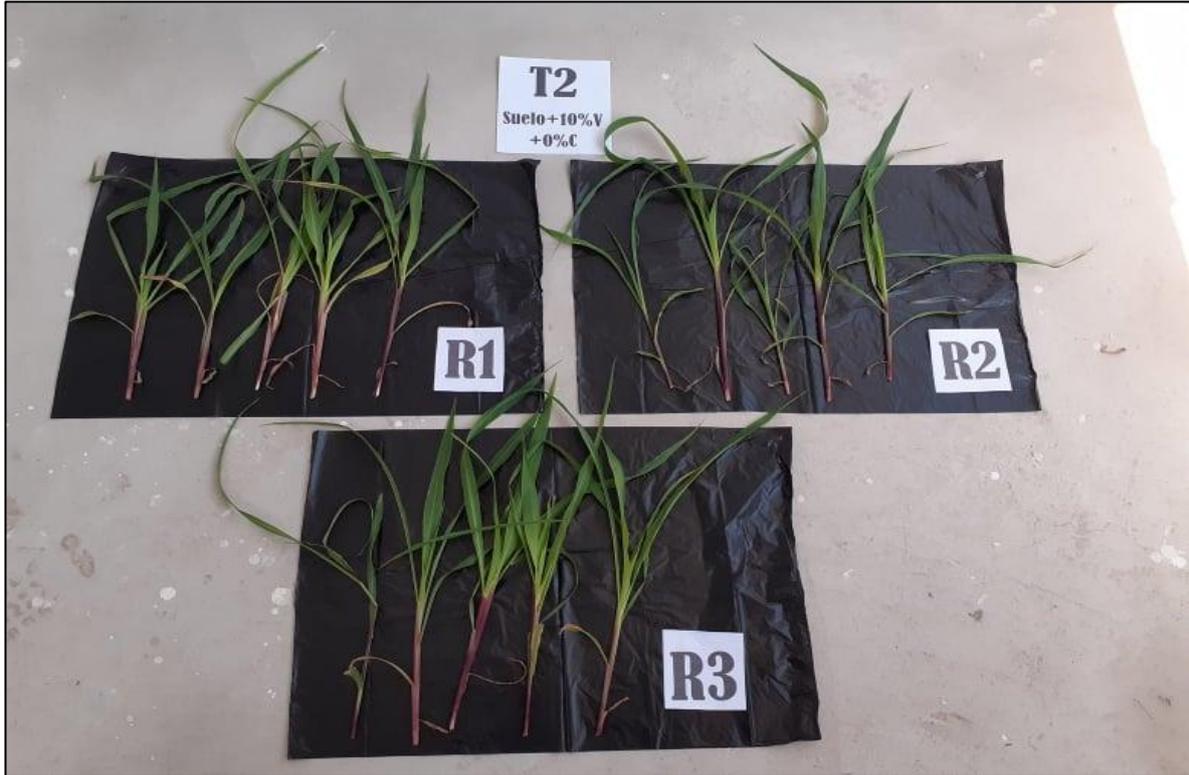
**Figura 24. Cultivo de maíz con 60 días, correspondiente al tratamiento 6 con sus 3 repeticiones.**



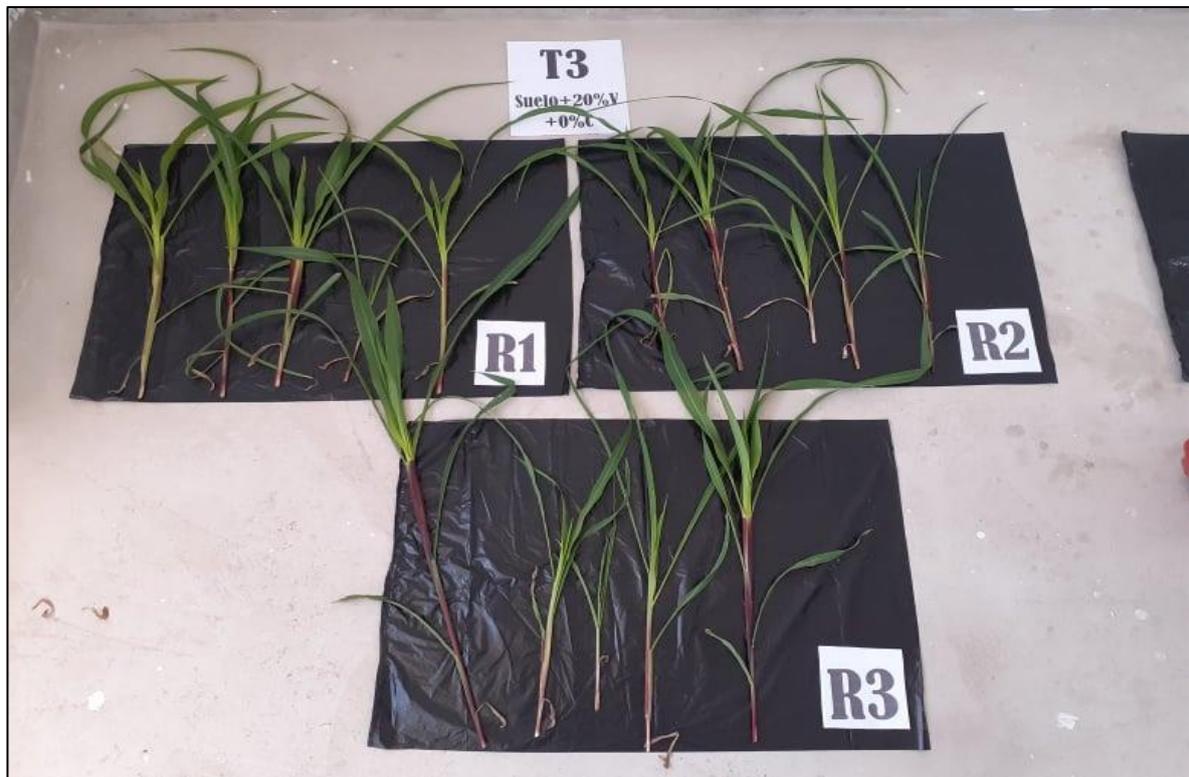
**Figura 25. Cultivo de maíz con 60 días, correspondiente al tratamiento 7 con sus 3 repeticiones.**



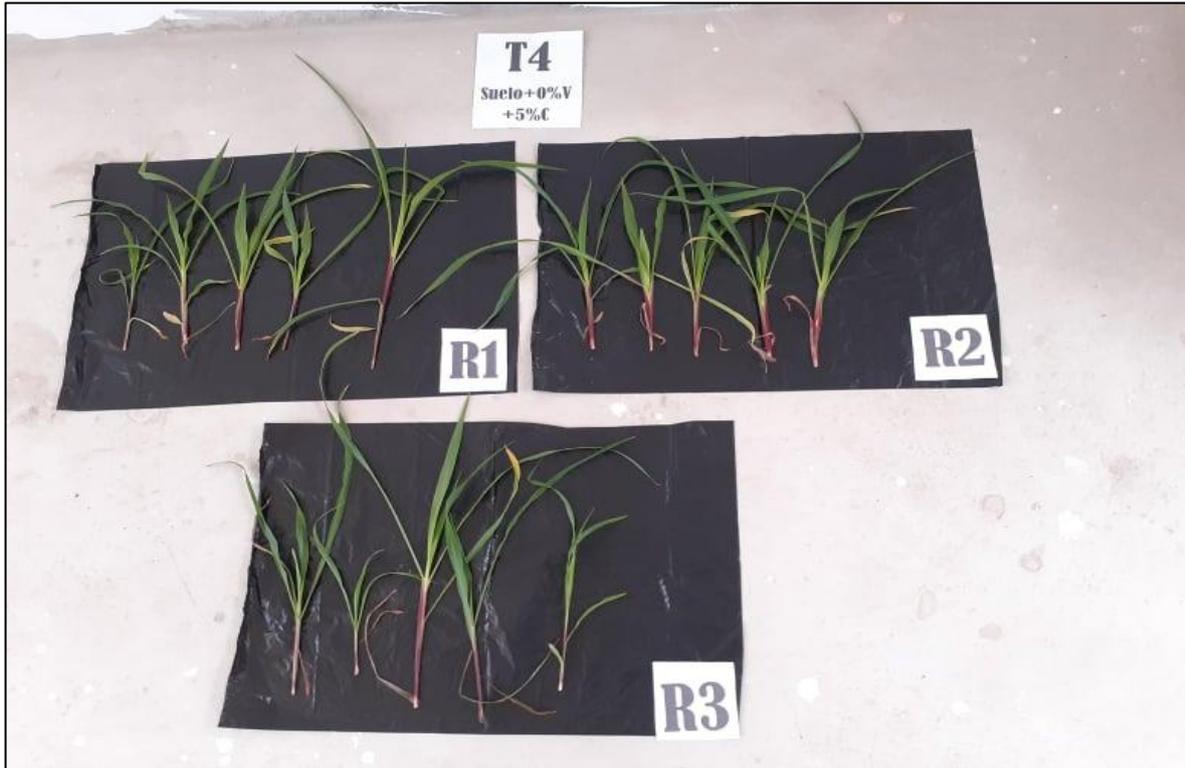
**Figura 26. Muestreo de la parte foliar del maíz, del tratamiento 1 y sus 3 repeticiones, para su análisis en laboratorio.**



**Figura 27. Muestreo de la parte foliar del maíz, del tratamiento 2 y sus 3 repeticiones, para su análisis en laboratorio.**



**Figura 28. Muestreo de la parte foliar del maíz, del tratamiento 3 y sus 3 repeticiones, para su análisis en laboratorio.**



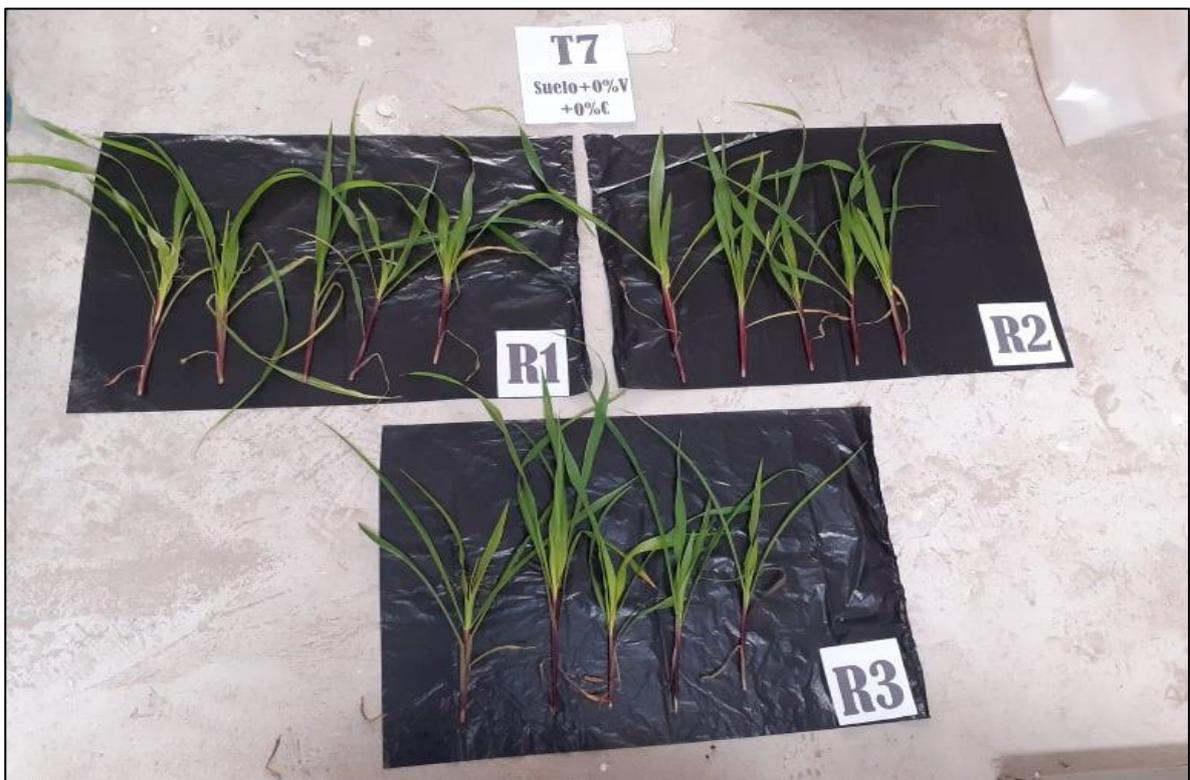
**Figura 29. Muestreo de la parte foliar del maíz, del tratamiento 4 y sus 3 repeticiones, para su análisis en laboratorio.**



**Figura 30. Muestreo de la parte foliar del maíz, del tratamiento 5 y sus 3 repeticiones, para su análisis en laboratorio.**



**Figura 31. Muestreo de la parte foliar del maíz, del tratamiento 6 y sus 3 repeticiones, para su análisis en laboratorio.**



**Figura 32. Muestreo de la parte foliar del maíz, del tratamiento 7 y sus 3 repeticiones, para su análisis en laboratorio.**



**Figura 33. Muestreo de la parte radicular del maíz, del tratamiento 1 con sus 3 repeticiones.**



**Figura 34. Muestreo de la parte radicular del maíz, del tratamiento 2 con sus 3 repeticiones.**



**Figura 35. Muestreo de la parte radicular del maíz, del tratamiento 3 con sus 3 repeticiones.**



**Figura 36. Muestreo de la parte radicular del maíz, del tratamiento 4 con sus 3 repeticiones.**



**Figura 37. Muestreo de la parte radicular del maíz, del tratamiento 5 con sus 3 repeticiones.**



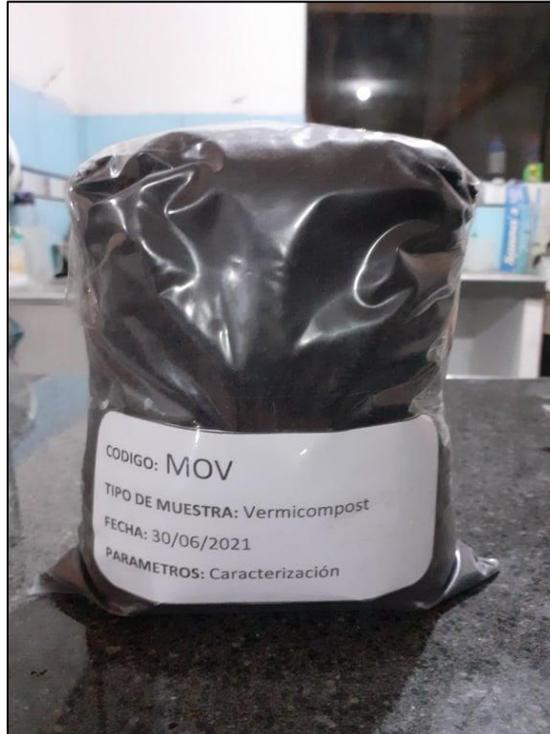
**Figura 38. Muestreo de la parte radicular del maíz, del tratamiento 6 con sus 3 repeticiones.**



**Figura 39. Muestreo de la parte radicular del maíz, del tratamiento 7 con sus 3 repeticiones.**



**Figura 40. Muestra del suelo, para su análisis de caracterización en laboratorio.**



**Figura 41. Muestra del vermicompost, para su análisis de caracterización en laboratorio.**



**Figura 42. Muestra del compost, para su análisis de caracterización en laboratorio.**



**Figura 43. Muestras de suelo de cada unidad experimental, para su análisis de Cadmio (Cd) en laboratorio.**



**Figura 44. Muestras de la parte foliar de cada unidad experimental, para su análisis de Cadmio (Cd) en laboratorio.**



**Figura 45. Muestras de raíz de cada unidad experimental, para su análisis de Cadmio (Cd) en laboratorio.**

## Anexo 4

### Informes de análisis de laboratorios



**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 : CIRO ELÍAS QUIÑÓNEZ ROJAS  
 Departamento : JUNÍN  
 Distrito : CHUPACA  
 Referencia : H.R. 74717-075C-21

Provincia : CHUPACA  
 Predio :  
 Fecha : 13/08/2021

Bolt: 4656

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>			
5979	Código. SC	7.53	0.30	15.74	2.43	22.8	141	40	35	25	Fr.	15.04	10.35	4.00	0.59	0.10	0.00	15.04	15.04	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



*Dr. Constantino Calderón Mendoza*  
**Jefe del 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



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



## INFORME DE ANALISIS DE MATERIA ORGANICA

SOLICITANTE : CIRO ELIAS QUIÑONEZ ROJAS  
PROCEDENCIA : JUNÍN/ CHUPACA/ CHUPACA  
MUESTRA DE : VERMICOMPOST  
REFERENCIA : H.R. 74720  
BOLETA : 4656  
FECHA : 23/08/2021

Nº LAB	CLAVES	pH	C.E. dS/m	M.O. %	N %	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> %	K <sub>2</sub> O %
353	-	6.66	4.26	26.68	1.55	0.51	0.25

Nº LAB	CLAVES	CaO %	MgO %	Hd %	Na %	Cd ppm
353	-	2.88	1.16	49.20	0.11	9.52



*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



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



## INFORME DE ANALISIS DE MATERIA ORGANICA

SOLICITANTE : CIRO ELIAS QUIÑONEZ ROJAS  
PROCEDENCIA : JUNÍN/ CHUPACA/ CHUPACA  
MUESTRA DE : COMPOST  
REFERENCIA : H.R. 74719  
BOLETA : 4656  
FECHA : 23/08/2021

N° LAB	CLAVES	pH	C.E. dS/m	M.O. %	N %	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> %	K <sub>2</sub> O %
352	-	5.56	3.24	24.97	0.85	0.25	0.47

N° LAB	CLAVES	CaO %	MgO %	Hd %	Na %	Cd ppm
352	-	1.41	0.54	35.81	0.06	8.23



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



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



## INFORME DE ANALISIS ESPECIAL EN SUELO

SOLICITANTE : CIRO ELÍAS QUIÑÓNEZ ROJAS  
PROCEDENCIA : JUNÍN/ CHUPACA/ CHUPACA  
REFERENCIA : H.R. 74718  
BOLETA : 4656  
FECHA : 18/08/2021

Lab	Número Muestra	Cd ppm
	Claves	
1869	ST1 R1	8.65
1870	ST1 R2	9.09
1871	ST1 R3	8.57
1872	ST2 R1	8.45
1873	ST2 R2	7.94
1874	ST2 R3	8.14
1875	ST3 R1	7.62
1876	ST3 R2	8.38
1877	ST3 R3	7.82
1878	ST4 R1	9.11
1879	ST4 R2	8.58
1880	ST4 R3	8.30
1881	ST5 R1	7.79
1882	ST5 R2	8.01
1883	ST5 R3	6.97
1884	ST6 R1	7.48
1885	ST6 R2	7.17
1886	ST6 R3	7.73
1887	ST7 R1	7.56
1888	ST7 R2	6.97
1889	ST7 R3	7.62



*Dr. Constantino Calderón Mendoza*  
Jefe del Laboratorio

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



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



## INFORME DE ANALISIS ESPECIAL EN FOLIAR

SOLICITANTE : CIRO ELÍAS QUIÑONEZ ROJAS  
PROCEDENCIA : JUNÍN/ CHUPACA/ CHUPACA  
MUESTRA : RAÍCES DE MAÍZ  
REFERENCIA : H.R. 74722  
BOLETA : 4656  
FECHA : 23/08/2021

N. Lab.	CLAVE DE CAMPO	Cd ppm
1761	RT1R1	14.26
1762	RT1R2	10.57
1763	RT1R3	9.36
1764	RT2R1	10.53
1765	RT2R2	12.30
1766	RT2R3	9.97
1767	RT3R1	13.31
1768	RT3R2	14.53
1769	RT3R3	11.62
1770	RT4R1	6.75
1771	RT4R2	6.66
1772	RT4R3	6.29
1773	RT5R1	9.36
1774	RT5R2	8.93
1775	RT5R3	7.25
1776	RT6R1	8.80
1777	RT6R2	7.08
1778	RT6R3	6.45
1779	RT7R1	6.40
1780	RT7R2	6.55
1781	RT7R3	6.29



*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



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



## INFORME DE ANALISIS ESPECIAL EN FOLIAR

SOLICITANTE : CIRO ELÍAS QUIÑONEZ ROJAS  
PROCEDENCIA : JUNÍN/ CHUPACA/ CHUPACA  
MUESTRA : HOJAS DE MAÍZ  
REFERENCIA : H.R. 74721  
BOLETA : 4656  
FECHA : 23/08/2021

N. Lab.	CLAVE DE CAMPO	Cd ppm
1740	HT1R1	0.49
1741	HT1R2	0.40
1742	HT1R3	0.43
1743	HT2R1	0.45
1744	HT2R2	0.58
1745	HT2R3	0.66
1746	HT3R1	0.60
1747	HT3R2	0.66
1748	HT3R3	0.65
1749	HT4R1	0.60
1750	HT4R2	0.56
1751	HT4R3	0.84
1752	HT5R1	0.66
1753	HT5R2	0.59
1754	HT5R3	0.68
1755	HT6R1	0.58
1756	HT6R2	0.54
1757	HT6R3	0.61
1758	HT7R1	0.55
1759	HT7R2	0.49
1760	HT7R3	0.55



*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