

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL  
DE HUAMANGA  
ESCUELA DE POSGRADO  
UNIDAD DE POSGRADO DE LA FACULTAD DE  
INGENIERÍA QUÍMICA Y METALURGIA**



**Remoción de metales pesados de los biosólidos de la planta de  
tratamiento de aguas residuales “La Totorá” Ayacucho, utilizando la  
alfalfa (*medicago sativa*)**

**TESIS PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE:  
MAESTRO EN INGENIERÍA AMBIENTAL**

**PRESENTADO POR:**

**Bach. Huallpa Vargas, Herlis Sergio**

**ASESOR:**

**Mg. Aronés Medina, Edgar Gregorio**

**AYACUCHO - PERÚ**

**2023**

## **DEDICATORIA**

Este trabajo de investigación lo dedico en especial a la memoria de mi querida madre Eleuteria Vargas, quien fue una mujer responsable y luchadora, de igual manera a mi padre Sergio Huallpa Taype una persona dechado, siempre lo tengo presente sus consejos desde la niñez hasta esta etapa de mi vida gracias a él soy lo que soy y a agradecer a toda mi familia, la razón y motor de seguir con más ganas de salir adelante en esta vida muy competitiva.

## AGRADECIMIENTO

A Dios por acompañarme, guiarme, darme salud y ganas de seguir adelante en esta vida.

A la Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga, en especial a la unidad de Posgrado de la Facultad de ingeniería Química y metalurgia, a la Maestría en Ingeniería Ambiental por brindarme y ampliar mis conocimientos para ser un buen profesional de éxito.

A la empresa que brinda servicio de Agua Potable y Alcantarillado de Ayacucho S.A (SEDA) en especial al biólogo Huincho encargado de la PTAR, por aceptar, apoyarme y permitirme el ingreso a la Planta de tratamiento de aguas residuales “La Totorá” para que este trabajo pueda ejecutarse.

De mismo modo agradecer a mi asesor al Ing. Edgar Aronés Medina por el tiempo y sugerencias en la ejecución de esta tesis, también agradecer al ingeniero Abraham Trejo, a mis amigos Yanett Navarro, Isai Limaco, William Solís y Flor de la cruz testigos del trabajo arduo que se ha realizado durante la ejecución de este proyecto de investigación.

En general a mis docentes y compañeros de la maestría que apoyaron en mi crecimiento y progreso profesional, sin su apoyo brindado no llegaría a esta etapa de ejecución y finalización de este presente trabajo de investigación, Gracias a todos.

## ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTO.....	iii
LISTA DE FIGURAS .....	vii
LISTA DE TABLAS.....	ix
RESUMEN.....	x
ABSTRACT.....	xiii
INTRODUCCIÓN.....	xiv
CAPÍTULO I PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	17
1.1. Descripción del problema .....	17
1.2. Formulación del problema .....	18
1.2.1. Problema general .....	18
1.2.2. Problemas específicos.....	19
1.3. Objetivos de la investigación .....	19
1.3.1. Objetivo general .....	19
1.3.2. Objetivos específicos .....	19
1.4. Hipótesis de la investigación .....	19
1.4.1. Hipótesis general .....	19
1.4.2. Hipótesis específica .....	20
1.5. Justificación de la investigación .....	20
1.6. Delimitación del problema.....	21
1.6.1. Espacial.....	21
1.6.2. Temporal.....	21
1.6.3. Social .....	21
CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO.....	22
2.1. Antecedentes de la investigación.....	22
2.1.1. A nivel internacional .....	22
2.1.2. A nivel nacional.....	24

2.1.3. A nivel local.....	26
2.2. Bases teóricas.....	27
2.2.1. Metales pesados.....	27
2.2.2. Cromo.....	28
2.2.3. Cadmio.....	29
2.2.4. Plomo.....	30
2.2.5. Biosólidos.....	32
2.2.6. Fitorremediación.....	37
2.2.7. Las ventajas y desventajas de la fitorremediación.....	38
2.2.8. Alfalfa ( <i>medicago sativa</i> ).....	42
2.2.9. Técnicas de determinación de metales pesados.....	48
2.2.10. Factores de concentración de los metales pesados.....	48
2.2.11. Estándares de calidad ambiental.....	49
2.3. Marco conceptual.....	50
2.4. Marco legal.....	52
CAPÍTULO III DISEÑO METODOLÓGICO.....	53
3.1. Tipo y nivel de investigación.....	53
3.2. Diseño de investigación.....	53
3.3. Población, muestra y muestreo.....	56
3.3.1. Población.....	56
3.3.2. Muestra.....	56
3.3.3. Muestreo.....	56
3.4. Variables e indicadores.....	56
3.5. Operacionalización de las variables.....	57
3.6. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	58
3.6.1. Acopio y procesamiento de datos.....	59
3.6.2. Materiales usada en la presente investigación.....	59
3.6.3. Equipo y/o instrumentos usados en la investigación.....	59
3.7. Procedimientos para la recolección de datos.....	60

3.7.1. Ubicación y descripción del área de estudio .....	60
3.7.2. Descripción de la siembra de alfalfa.....	62
3.7.3. Preparación de las macetas y siembra .....	63
3.7.4. Obtención de muestras.....	67
3.8. Técnicas de procesamiento y cuantificación de datos .....	74
3.8.1. Cuantificación de metales pesados del biosólido más tierra .....	74
3.8.2. Cuantificación de metales pesados en la alfalfa ( <i>medicago sativa</i> ) .....	74
CAPÍTULO IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	75
4.1. Resultados del contenido de metales pesados.....	75
4.1.1. Respecto al contenido de los metales pesados en los biosólidos.....	75
4.1.2. Metales pesados en los biosólidos acondicionados con tierra.....	77
4.1.3. Cromo en los biosólidos más tierra después del uso de alfalfa .....	78
4.1.4. Cadmio en los biosólidos más tierra después de la fitorremediación.....	84
4.1.5. Plomo en los biosólidos más tierra después de la fitorremediación .....	90
CONCLUSIONES.....	97
RECOMENDACIONES .....	99
REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA.....	100
ANEXOS.....	106

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Biosólidos en los lechos de secado .....	33
Figura 2 Biosólidos secadas a la intemperie.....	34
Figura 3 Lodos orgánicos trasladados a los lechos de secado.....	35
Figura 4 Cultivo de la vegetación en temporadas de otoño.....	36
Figura 5 Proceso fitoextractor .....	41
Figura 6 Planta de alfalfa (medicago sativa) .....	43
Figura 7 Morfología de la planta .....	45
Figura 8 Siembra de alfalfa en seco.....	46
Figura 9 Alfalfa sembrado en surco .....	47
Figura 10 Variedades de alfalfa usada en la investigación.....	54
Figura 11 Variedad de alfalfa master10 sembrada a diferentes densidades .....	55
Figura 12 Variedades de alfalfa sembrada a una sola densidad .....	55
Figura 13 Localización de la PTAR “la Totora” .....	60
Figura 14 Ubicación de la instalación de las macetas .....	61
Figura 15 Recojo de los biosólidos de la PTAR “La Totora” .....	64
Figura 16 Preparación de biosólidos acondicionado con tierra para el experimento .....	65
Figura 17 Preparación de macetas para la siembra de alfalfa.....	66
Figura 18 Medida de la altura de la planta de alfalfa (medicago sativa).....	66
Figura 19 Muestreo del biosólido acondicionado con tierra antes de la siembra.....	69
Figura 20 Muestreo del biosólido acondicionado con tierra después de la cosecha .....	70
Figura 21 Toma de muestras de las plantas de alfalfa (medicago sativa) .....	71
Figura 22 Secado de alfalfa (medicago sativa).....	72
Figura 23 Muestras rotuladas para el análisis en el laboratorio .....	73
Figura 24 Presencia de metales pesados en los biosólidos residuales.....	76

Figura 25 Metales pesados en los biosólidos acondicionado con tierra .....	78
Figura 26 Presencia de Cromo en las macetas después de la fitorremediación .....	83
Figura 27 Cadmio en las raíces de alfalfa después de la fitorremediación .....	89
Figura 28 Plomo en las raíces de alfalfa después de la fitorremediación .....	95
Figura 29 Distribución de las macetas para el sembrado de la alfalfa .....	107
Figura 30 Vigilancia de las macetas experimentales .....	107
Figura 31 Siembra de alfalfa una semana después .....	108
Figura 32 Siembra de alfalfa un mes después .....	109
Figura 33 Siembra de alfalfa dos meses después .....	109
Figura 34 Siembra de alfalfa tres meses después .....	110
Figura 35 Macetas con plantas de alfalfa después de cumplir seis meses .....	110
Figura 36 Cosecha de alfalfa (medicago sativa) .....	111
Figura 37 Estándar de calidad ambiental para suelo .....	124

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Efectos en la salud humana por metales pesados .....	32
Tabla 2 Taxonomía de la alfalfa (medicago sativa) .....	43
Tabla 3 Estándares de calidad ambiental para suelos contaminados.....	50
Tabla 4 Características de las macetas experimentales .....	54
Tabla 5 Operacionalización de variables.....	57
Tabla 6 Características de la siembra de alfalfa en las macetas .....	63
Tabla 7 Preparación de biosólidos más tierra.....	65
Tabla 8 Toma de muestras de biosólidos, biosólidos más tierra y plan .....	68
Tabla 9 Simbología utilizada en el experimento .....	68
Tabla 10 Metales pesados de mayor concentración en los biosólidos .....	76
Tabla 11 Metales pesados en biosólidos más tierra antes de la fitorremediación .....	77
Tabla 12 Cromo en las macetas experimentales después del uso de alfalfa.....	79
Tabla 13 Cromo en las raíces de alfalfa después de la fitorremediación .....	79
Tabla 14 Cromo en los tallos y hojas de alfalfa después de la fitorremediación .....	80
Tabla 15 Factor de bioconcentración del cromo .....	81
Tabla 16 Factor de traslocación del cromo.....	82
Tabla 17 Cadmio en las macetas experimentales después de la fitorremediación .....	85
Tabla 18 Cadmio en las raíces de alfalfa después de la fitorremediación.....	85
Tabla 19 Cadmio en los tallos y hojas de alfalfa después de la fitorremediación.....	86
Tabla 20 Factor de bioconcentración del cadmio .....	87
Tabla 21 Factor de traslocación del cadmio .....	88
Tabla 22 Plomo en las macetas experimentales después de la fitorremediación .....	91
Tabla 23 Plomo en las raíces de alfalfa después de la fitorremediación .....	91
Tabla 24 Plomo en los tallos y hojas de la alfalfa después de la fitorremediación .....	92

Tabla 25 Factor de bioconcentración del plomo .....	93
Tabla 26 Factor de traslocación del plomo.....	94
Tabla 27 Metales pesados en los biosólidos residuales.....	112
Tabla 28 Metales pesados presentes en los biosólidos más tierra .....	112
Tabla 29 Cromo en los biosólidos más tierra después de la fitorremediación .....	113
Tabla 30 Cadmio en los biosólidos más tierra después de la fitorremediación.....	113
Tabla 31 Plomo en los biosólidos más tierra después de la fitorremediación.....	114
Tabla 32 Cromo en la raíz de la alfalfa después de la fitorremediación .....	114
Tabla 33 Cadmio en la raíz de la alfalfa después de la fitorremediación .....	115
Tabla 34 Plomo en la raíz de la alfalfa después de la fitorremediación .....	115
Tabla 35 Cromo en los tallos y hojas de la alfalfa después de la fitorremediación.....	116
Tabla 36 Cadmio en los tallos y hojas de la alfalfa después de la fitorremediación ....	116
Tabla 37 Plomo en los tallos y hojas de la alfalfa después de la fitorremediación .....	117

**ÍNDICE DE ANEXOS**

<b>Anexo 1</b> Fotografías del Experimento de investigación en campo .....	107
<b>Anexo 2</b> Proceso del crecimiento de alfalfa durante los 6 meses .....	108
<b>Anexo 3</b> Resultados de los metales pesados en los biosólidos.....	112
<b>Anexo 4</b> Análisis de metales pesados por ICP-OES .....	118
<b>Anexo 5</b> Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Suelo .....	124

## RESUMEN

La investigación desarrollada ha permitido evaluar el grado de remoción utilizando alfalfa (*medicago sativa*) en la remoción de metales pesados de los biosólidos de la planta de tratamiento de aguas residuales “la Totora”. Se empleó un diseño metodológico aplicativo con enfoque explicativo y diseño experimental completamente randomizado. Se determinó la concentración inicial de metales pesados en los biosólidos por la técnica de Espectroscopía de Emisión Atómica con Plasma de Acoplamiento Inductivo (ICP-OES), siendo para el cromo 320,7 mg/kg, para cadmio 7,3 mg/kg y plomo de 37,7 mg/kg. El material de remoción utilizado estuvo conformado con 45 % de biosólido y 55 % de tierra, se sembró alfalfa con tres densidades diferentes empezando con la variedad "Master10", "Moapa" y "California". Se utilizó agua potable durante el tiempo de siembra hasta la cosecha. Así mismo, para el material de remoción se determinó el contenido de metales pesados siendo para el cromo de 257,7 mg/kg, cadmio 7,0 mg/kg y plomo 27,3 mg/kg y una vez culminada la remoción con la alfalfa, se logra reducir los niveles de contaminación especialmente con la variedad "California" a 25 kg/ha, removiendo cromo en un (43 %), cadmio (76 %) y plomo (71 %), estos dos últimos quedando por debajo de los límites máximos permisibles para uso agrícola. El cromo por presentar alta concentración antes de la remoción aún excede los LMP para este uso. Se concluye que la alfalfa (*medicago sativa*) sembrados en sistemas formuladas con biosólidos, permite remover metales pesados en tanto en la raíz como en el tallo y que puede ser aplicado en la planta de tratamiento de aguas residuales “la Totora”.

**Palabras clave: Metales pesados, remoción, alfalfa y biosólidos.**

## ABSTRACT

The research carried out has allowed evaluating the degree of removal by means of the alfalfa plant (*medicago sativa*) to remove heavy metals from the biosolids of the "la Totorá" wastewater treatment plant. An applicative methodological design with an explanatory approach and a completely randomized experimental design was used. The initial concentration of heavy metals in the biosolids was determined by the technique of Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectroscopy (ICP-OES), being for chromium (320,7 mg/kg), cadmium (7,3 mg/kg) and lead (37,7 mg/kg). The removal material used was made up of 45 % biosolids and 55 % soil, alfalfa was planted with three different densities starting with the "Master10", "Moapa" and "California" variety. Potable water was used during planting time until harvest. Likewise, for the removal material, the content of heavy metals was determined, being for chromium (257,7 mg/kg), cadmium (7,0 mg/kg) and lead (27,3 mg/kg) and once After removal with alfalfa, it is possible to reduce contamination levels, especially with the "California" variety at 25 kg/ha, removing chromium (43 %), cadmium (76 %) and lead (71 %), these two the latter being below the maximum permissible limits for agricultural use. Chromium, due to its high concentration before removal, still exceeds the MLP for this use. It is concluded that alfalfa (*medicago sativa*) planted in systems formulated with biosolids, allows to remove heavy metals in both the root and stem and that it can be applied in the "la Totorá" wastewater treatment plant.

**Keywords: Heavy metals, removal, alfalfa and biosolids.**

## INTRODUCCIÓN

En los últimos años, se ha observado un aumento significativo en la generación de biosólidos en las plantas de tratamiento de aguas residuales a nivel mundial. El enfoque adecuado para el tratamiento y manejo de estos residuos ha surgido como un tema de alto interés en todos los países. Es destacable que metales pesados como el Cadmio (Cd), Plomo (Pb), Zinc (Zn), Cromo (Cr), Cobre (Cu) y Níquel (Ni) se han encontrado con frecuencia considerable en los biosólidos residuales.

Dentro de este contexto, la utilización de biosólidos residuales para enriquecer suelos agrícolas empobrecidos en nutrientes o degradados debido a la actividad humana se ha presentado como una solución pragmática y expedita para abordar la escasez de recursos esenciales. Esta estrategia, propuesta por (Hernández, et al., 2017), parece ofrecer una alternativa viable.

En la actualidad, en la planta de tratamiento de aguas residuales "la Totora", la eliminación o recuperación de metales pesados de los biosólidos orgánicos no está siendo abordada ni evaluada de manera adecuada, principalmente debido a la asignación insuficiente de recursos financieros. Es importante destacar que la sostenibilidad de los biosólidos generados en las plantas de tratamiento de aguas residuales, constituye aproximadamente el 60 % de los costos operativos totales del proceso de operación. (Aramburu & Trejo, 2021).

Gran cantidad de biosólidos se destina al campo de secado final de los biosólidos y esta son vendidas a los agricultores de las diferentes zonas para ser usado como abono en los cultivos, pero sin embargo estos biosólidos contienen metales pesados como cromo: cadmio, plomo y entre otros. Los agricultores por desconocimiento lo usan en dichos cultivos, por tanto, es necesario conocer las concentraciones de dichos metales en los biosólidos.

Uno de las técnicas o métodos para remover metales pesados es usando la planta nativa alfalfa (*medicago sativa*), quien absorbe y acumula en sus raíces al metal pesado. La ventaja de usar alfalfa (*medicago sativa*) es su fácil adquisición en la región y su bajo costo. (Giraldez, 2019).

Existen diferentes plantas que absorben metales pesados como: maíz, perejil y girasol que son consideradas como plantas excluseras o estabilizadoras de metales pesados. (Munive, 2018).

El objetivo del trabajo de investigación es sobre la aplicación de la planta alfalfa (*medicago sativa*) como material absorbente de metales pesados de los biosólidos residuales producidas en la planta de tratamiento de aguas residuales “la Totorá”. En tal sentido, para ello se han instalado diferentes macetas experimentales con siembra de alfalfa (*medicago sativa*), con diferentes variedades de planta y densidades de siembra; para evaluar la remoción de los metales pesados, y de esta manera encontrar la variedad y densidad adecuado para la remoción.

El presente estudio de investigación consta de:

Capítulo I, en ella se detalla el planteamiento del problema, los antecedentes, la justificación, los objetivos e hipótesis del trabajo de investigación.

Capítulo II, se muestra el marco teórico referidos a la contaminación de los biosólidos por metales pesados, contaminación de aguas residuales por metales pesados, de mismo modo, la literatura sobre la aplicación de la fitorremediación; sobre la planta de alfalfa (*medicago sativa*), el marco conceptual, y marco legal que sustenta la presente investigación.

Capítulo III, se describe el diseño metodológico empleado, instrumentos y procedimientos a seguir para el desarrollo del trabajo de investigación.

Capítulo IV, se presentan los resultados, análisis e interpretación de los resultados y discusiones que sustentan el presente trabajo de investigación.

## CAPÍTULO I

### PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

#### 1.1. Descripción del problema

Hoy en día, a nivel mundial las plantas de tratamiento de aguas residuales en su etapa primario y secundario producen gran cantidad de lodos orgánicos y estas son almacenadas en lechos de secado, una vez secada y estabilizada están disponibles para su uso como biosólido orgánico para la agricultura. Las plantas de tratamiento de aguas residuales en países desarrollados cuentan con procesos de tratamiento muy eficiente para realizar sin inconvenientes, sin generar daños al ecosistema debido a la existencia de diversas técnicas para remover los metales pesados de lodos orgánicos residuales a pesar de su costo, como procesos electroquímicos y resinas de intercambio iónico y entre otros.

En el Perú, el crecimiento considerable de sus habitantes en 1, 2 % (INEI, 2017) genera alto nivel de contaminación de nuestros recursos hídricos con la metalurgia, materiales refractarios, galvanización, pinturas, conservación de madera, industria química, el proceso de curtido de pieles que emplean sales de cromo como agentes curtientes y la técnica no apropiada en sus efluentes son causas de que las plantas de tratamiento de aguas residuales ocasionan impactos negativos al ambiente. (Caviedes, et al., 2015).

Es así que los contenidos de metales pesados en biosólidos de las plantas de tratamiento de aguas residuales no son tratados adecuadamente para llegar hasta su destino final a la agricultura, por las mínimas inversiones para el tratamiento, debido al costo elevado de su implementación ya sea de los reactores estabilizadores o sistemas de deshidratación. Desde los años 90 en el Perú los biosólidos residuales en la planta de tratamiento de aguas residuales cuentan con metales pesados como el cromo (VI), cadmio y plomo lo cual no han sido controlados por la legislación ambiental, en las últimas décadas se promulgó leyes para conservar el medio ambiente como el aire, suelo y agua para prevenir

efectos dañinos en la salud humana. (Chavez, 2014).

En la PTAR “la Totora” de Ayacucho, el lodo obtenido de los filtros percoladores y de la laguna facultativa secundaria, causa un impacto ecológico negativo debido al alto contenido de patógeno y metales pesados que los contienen, una vez deshidrata en los lechos de secado estas son llamadas “biosólidos” la cual existe deficiente tratamiento de estos biosólidos orgánicos y mucho menos de la remoción de los metales pesados, por otro lado también existe el incremento de los lodos en la etapa primario y secundario, sobrepasar la capacidad de diseño de los lechos de secado, estas afectan el tiempo de lixiviado y por ende no se genera un buen secado de los biosólidos, más aún si se prolifera los microorganismos patógenos, hace 10 años gran cantidad de agricultores utilizaban estos biosólidos como abono para sus plantaciones. Al tener conocimiento que estos abonos contenían metales pesados dejaron de utilizar porque afectaba a sus plantaciones, por motivo de ser observados por la SENASA por no cumplir con la condición orgánica del producto, hoy en día es mínimo su uso del biosólido.

En tal sentido, es necesario ejecutar trabajos de investigación sobre el impacto de remover los metales pesados de los biosólidos residuales, incorporando una metodología de tratamiento adecuado en los biosólidos, utilizando una planta capaz de remover y acumular metales pesados en sus raíces, de esta manera se estará cumpliendo los límites máximos permisibles y así pueda llevarse la instalación posterior a nivel planta en la PTAR “la Totora”- Ayacucho y así darle uso a los biosólidos en la agricultura.

## **1.2. Formulación del problema**

### ***1.2.1. Problema general***

¿Cómo remover los metales pesados de los biosólidos de la planta de tratamiento de aguas residuales “la Totora” Ayacucho, utilizando la alfalfa (*medicago sativa*)?

### **1.2.2. Problemas específicos**

- a) ¿Cuál es la concentración de metales pesados, en los biosólidos de los lechos de secado de la PTAR “la Totora”?
- b) ¿Cuál es la concentración de metales pesados, culminada el tiempo de remoción en los biosólidos residuales, raíces y en la parte aérea de alfalfa?
- c) ¿Cuál es el porcentaje de remoción de metales pesados de los biosólidos residuales, utilizando la alfalfa (*medicago sativa*)?

## **1.3. Objetivos de la investigación**

### **1.3.1. Objetivo general**

Remover los metales pesados de los biosólidos de la planta de tratamiento de aguas residuales “la Totora” Ayacucho, utilizando la alfalfa (*medicago sativa*).

### **1.3.2. Objetivos específicos**

- a) Determinar la concentración de los metales pesados, en los biosólidos de los lechos de secado de la PTAR la Totora.
- b) Determinar la concentración de metales pesados, culminada el tiempo de remoción en los biosólidos residuales, raíces y en la parte aérea de alfalfa.
- c) Determinar el porcentaje de remoción de metales pesados de los biosólidos residuales, utilizando la alfalfa (*medicago sativa*).

## **1.4. Hipótesis de la investigación**

### **1.4.1. Hipótesis general**

El uso de la alfalfa (*medicago sativa*) permitirá un alto grado de remoción de metales pesados de los biosólidos en la planta de tratamiento de aguas residuales “la Totora”.

#### **1.4.2. Hipótesis específica**

- a) La caracterización química permite cuantificar la concentración de metales pesados en los biosólidos de los lechos de secado de la PTAR Totorá.
- b) La concentración de metales pesados en los biosólidos residuales de la PTAR la Totorá está por debajo de los límites máximos permisibles.
- c) El uso de alfalfa (*medicago sativa*) como material adsorbente permite un alto grado de remoción de metales pesados en los biosólidos.

#### **1.5. Justificación de la investigación**

En la investigación se pretende implementar una metodología para remover los metales pesados presentes en los biosólidos residuales, estos contaminantes hoy en día generan impactos negativos para su uso en la agricultura, la remoción con la planta alfalfa es factible debido a su bajo costo en instalación y siembra. La planta alfalfa (*medicago sativa*), los materiales de implementación y acondicionamiento de las macetas para el tratamiento se encuentran disponibles en la región.

Una vez implementado el sistema de remoción nos facilitará informaciones reales luego de la prueba, de esta manera se estaría desarrollando a gran escala en la PTAR “la Totorá”.

El biosólido separado de los metales pesados se almacenará para luego ser utilizado en la agricultura como abono orgánico, el cual con este proyecto gracias a la fitorremediación los agricultores de la región son los beneficiados ya que estos biosólidos tendrá mínima cantidad de metales pesados y los vegetales que los agricultores siembran estarán libres de contaminación.

Por tal motivo surge la necesidad de eliminar o disminuir según límites máximos permisibles los metales pesados, de esta manera evitar los impactos negativos que originan al medio ambiente.

## **1.6. Delimitación del problema**

### ***1.6.1. Espacial***

Se utilizó la planta alfalfa (*medicago sativa*) planta oriunda de la zona, la parte experimental se realizó en la planta de tratamiento de aguas residuales “la Totorá” ubicada en la jurisdicción del distrito Jesús Nazareno, en la provincia de Huamanga y departamento de Ayacucho, a una altitud de 2610 m.s.n.m. Los análisis de los contenidos de metales pesados se realizaron como servicios o terceros en la empresa Actlabs Skyline Perú S.A.C acreditados por SCC Canadá y Certificados por IQNET Y AENOR ISO 9001.

### ***1.6.2. Temporal***

La investigación, se realizó durante los meses de septiembre de 2022 a abril 2023.

### ***1.6.3. Social***

Con esta investigación se busca realizar una alternativa de solución al problema de la contaminación con metales pesados en los biosólidos residuales. La alternativa de solución es limpia, natural y de bajo costo por el mismo hecho de usar la planta alfalfa (*medicago sativa*) como acumuladora de los metales pesados, una vez extraída los metales pesados, los biosólidos podrían ser usadas ya sea como abono para la agricultura u otro uso que crea conveniente la población.

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1. Antecedentes de la investigación

##### 2.1.1. A nivel internacional

Martel (2014), desarrolló su trabajo de investigación usando la técnica de dos variedades de plantas llamadas *Lolium perenne* L (pasto perenne) y *Beta vulgaris* L (acelga) con fines de remover y/o acumular metales pesados. Las especies y/o tipos de plantas como el *Lolium perenne* L. y *Beta vulgaris* L. fueron usadas con fines de reducir los metales pesados en suelos contaminados, para tal fin usaron como aporte el EDTA para comprobar si la ayuda de un aporte puede solubilizar los metales pesados en su mayoría, finalmente sometió uno de ellos respectivamente en suelo de Cuemanco con EDTA y en el suelo de Cuemanco sin el uso del EDTA por el mismo motivo que se ha regado con aguas de la planta de tratamiento del Cerro de la Estrella. Como resultados obtuvieron con la planta *Beta vulgaris* L, en presencia de EDTA obtuvieron las concentraciones de menor a mayor empezando con el Zinc en la raíz (34,78 mg/kg), cadmio (46 mg/kg), níquel (48,75 mg/kg), cobre (90,75 mg/kg), cromo (350,16 mg/kg) y plomo (681,66 mg/kg) mientras sin EDTA las concentraciones en raíz para zinc fue (52,64 mg/kg), cobre (65,08 mg/kg), cromo (253,05 mg/kg) y plomo (408,33 mg/kg). La concentración más significativa en el sitio aéreo es de Zn (56,74 mg/kg) y de níquel (23,72 mg/kg). Ahora para *Lolium perenne* L. El plomo ha concentrado mayor cantidad de (467,5 mg/kg) en la raíz y añadiendo EDTA, en menor cantidad el cromo (257,125 mg/kg), zinc (65,05 mg/kg), cadmio (64,5 mg/kg), níquel (55,75 mg/kg), cobre (40,6 mg/kg) y sin el aporte (EDTA) la máxima acumulación de plomo se vio en la raíz (255 mg/kg), cromo (218,4 mg/kg); mientras el zinc acumuló mayor cantidad en el sitio aéreo (53,846 mg/kg), seguida por níquel (43,2 mg/kg), cadmio (23,16 mg/kg) y cobre (20,25 mg/kg).

De tal modo Martel, concluye que *Beta vulgaris* L y *Lolium perenne* L son plantas que, si son capaces de remover los metales pesados acumulando en sus raíces, portándose como biorremediadores de metales pesados y de mismo hiperacumuladoras del zinc en los suelos sin la ayuda del aporte (EDTA).

Abril (2016), desarrolló en su trabajo de investigación comparando dos especies vegetales como: La alfalfa (*Medicago sativa*) y lechuguín (*Eichhornia crassipes*) desarrollando la etapa real y/o experimental, luego realizó los estudios de laboratorio que constataron las variables usadas para esta investigación: cromo (VI) y pH. La construcción y acondicionamiento a nivel piloto se realizaron en función a la adaptación y tiempo de crecimiento de los vegetales que se usaría en dicha investigación. Las plantas fueron trasplantadas en suelos contaminados con concentración de 0,28 mg/kg de cromo (VI) y en el agua con 2,01 mg/L de cromo. Con el fin de realizar la velocidad de degradación y del mismo modo analizaron las tres muestras en el laboratorio desde el inicio del proceso, en los 45 días de la evaluación y otra al finalizar después de los 65 días. Los resultados obtenidos demostraron que el cromo (VI) es removido en mayor eficiencia en fase acuoso con 99 % del contaminante. Por lo tanto, concluye que: la lechuguín por el mismo motivo que es acuático puede retener un 86, 06 % del cromo (VI), mientras la alfalfa solo pudo absorber un 67, 85 %.

Salazar (2014), en su trabajo de investigación usó plantas silvestres y nativas como la especie, *Tagetes minuta* L. y *Bidens pilosa* L. del mismo lugar y otra especie no nativa llamada *Sorghum halepense*, todas con fines de remoción de metales pesados como el plomo. Los resultados obtenidos de la concentración en las hojas fueron significativos 380,5 mg/g y 100,6 mg/g sucesivamente de las especies nativas, donde la concentración inicial del plomo en el suelo antes de la fitorremediación fue 1600 mg/g, también se pudo evaluar la concentración de la especie *Sorghum halepense* pero esta especie tuvo mejores resultados

ya que bioacumuló en sus raíces concentración elevada de 1406,8 mg/g, por tanto, concluye que: este último especie es una planta fitoestabilizadora del metal en el suelo.

### 2.1.2. A nivel nacional

Giraldez (2019), determinó en su trabajo de tesis, que el uso de la Fito extractora con la alfalfa para remediar suelos degradados por fertilizaciones dio buenos resultados, en la investigación realizó acondicionando la alfalfa con sus respectivas densidades en tres parcelas P1 (baja), P2 (media) y P3 (alta). De la misma manera realizó la toma muestras del suelo antes de sembrar y luego una vez realizada la cosecha, las muestras fueron llevados a los laboratorios CERPER S.A para sus respectivos análisis. Sus resultados obtenidos nos detallan que *Medicago sativa* ha podido remover los metales pesados de los suelos en gran cantidad como: parcela P1: cadmio (25,92 %), níquel (23,78 %) y plomo (20,65 %). P2: cadmio (11,56 %), níquel (13,03 %) y plomo (5,49 %) y P3: cadmio (34,03 %), níquel (16,11 %) y plomo (25,93 %), por tanto, concluye que la alfalfa (*Medicago sativa*) actúa como especie extractora y también puede asimilar y/o estabilizador todo los metales pesados en los raíces, también indica que el factor de acumulación en las tres parcelas eran menos de 1 (P1: Cd 0,30; Ni 0,20; Pb 0,19; P2: Cd 0,10; Ni 0,07; Pb 0,05; P3: Cd 0,27; Ni 0,13; Pb 0,24) y el factor de asimilación igual fue menos de 1 en tres parcelas, esto significa que la especie vegetal no transfiere eficientemente el metal pesado de los raíz al sitio y/o parte aérea del vegetal; entonces su capacidad es de Fito estabilizar a los metales pesados en sus raíces.

Rodrigo (2018), indica que su investigación tuvo como fin estudiar la técnica fitorremediadora con la planta *Helianthus annuus* aumentando una enmienda (guano de isla) a los suelos contaminados de cromo y plomo de industrias metalmecánicas. Mientras para la ejecución de la investigación tuvo que buscar la disponibilidad de las semillas de la planta y un lugar para poder acondicionar, luego distribuyeron en 12 macetas que fueron realizados cuatro tratamientos para poder realizar su cultivación en tiempo de 60 días de los meses de

agosto a septiembre en el mismo vivero de la Universidad Peruana Unión (UPEU) usando la enmienda el guano de isla combinando con el suelo contaminado. La función de la evaluación del empleo de la planta *Helianthus annuus* realizó variando el pH, Conductividad eléctrica y el crecimiento de la planta y viendo las característica del vegetal, al finalizar obtuvo los resultados de la evaluación aplicando enmiendas para el tratamiento T3 y T4 favoreciendo en la acumulación del Pb (75,54 ppm de Pb y en T3; 46,09 ppm de Pb en T4) y en la planta (50,70 ppm de Pb en T3; 41,30 ppm de Pb en T4) del planta *Helianthus annuus*; para el cromo el Cr (47,40 ppm de Cr en T3; 79,5 ppm de Cr en T4) y en la planta (9,21 ppm de Cr en T3 y 19,3 ppm de Cr en T4). Por tanto, concluye que la planta *Helianthus annuus* acumuló altas concentraciones de plomo y cromo en tratamientos T3 y T4 de mismo modo logró una eficiencia considerable del crecimiento (adaptación) en los tratamientos.

Mendoza (2020), en su trabajo de investigación desarrollada evaluó la capacidad fitorremediadora de la planta alfalfa de los suelos contaminados con 3 concentraciones de plomo; desde 70,140 y 210 mg/kg y con testigo en blanco 0 mg/kg, realizada el trabajo de tesis en macetas durante 45 y 90 días, usando el diseño metodológico de bloques completamente aleatorizados, obteniendo resultados de sus evaluaciones tanto en campo como en laboratorio con respecto a la absorción de plomo y con la ayuda de la alfalfa encontró que la extracción era mayor a través de las raíces y menor a través de la parte aérea de la planta ya sea a los 45 días como a los 90 días con valores de 23,933 mg/kg y 41,667 mg/kg sucesivamente en las raíces. El metal pesado remanente en el suelo fue mayor a los 45 días y menor a los 90 días, con la máxima concentración de 210 mg/kg de plomo en el tratamiento. Por tanto, concluye que al aumentar la concentración del plomo en el suelo también aumenta el poder de absorción de la alfalfa y por último el factor de bioconcentración evaluada es menor a 1 tanto en las raíces y parte aérea.

### **2.1.3. A nivel local**

Córdova (2019), estudió el nivel de contaminación de las hortalizas por metales pesados con efluentes de la PTAR, usó el diseño Experimental con Parcelas Divididas, en tamaños completos aleatorizados, con un arreglo factorial de 2 F x 3 E. sembró tres tipos de hortalizas: rabanito, espinaca y lechuga, estas han sido regadas con dos tipos de aguas una con aguas del efluente de PTAR (aguas servidas) y con aguas del grifo de la misma comunidad de Totorá hasta alcanzar la maduración de cada hortaliza. El análisis de los metales pesados como el cadmio, cromo y plomo presentes en estas hortalizas fue determinado por ICP-OES. Los resultados del autor fueron sorprendentes, en las hortalizas que habían sido regadas con aguas del grifo la asimilación o absorción de cadmio fue: espinaca 0,42 mg/kg resultado que supera el límite máximo permisible; lechuga 0,176 mg/kg, no supera el límite máximo permisible; rabanito < 0,10 mg/kg, no supera el límite máximo permisible. Ahora La absorción de cromo (VI) en las hortalizas que han sido regadas con agua de efluentes de la PTAR fueron: lechuga 2,63 mg/kg, supera el límite máximo permisible; espinaca 1,04 mg/kg, de la misma manera supera el límite máximo permisible y rabanito 1,00 mg/kg de la misma manera supera los límites máximos permisible. Por tanto, concluye que los efluentes de la PTAR intervienen en la contaminación con metales pesados en las hortalizas que fueron regadas con la misma agua.

Aronés (2011), en su investigación realizada al río Alameda a cerca de la contaminación con cromo, encontró que el nivel de contaminación más alta del río con cromo se da en la época de estiaje. En su investigación realizada en el río Alameda cuantificó las concentraciones del metal pesado cromo, tomando muestras en 04 estaciones que fue monitoreado en fechas de muestreo en la extensión del río Alameda, también tomó una estación para el muestreo a la salida del efluente de la PTAR Totorá. Dichas muestras fueron realizadas en años de 2008 y 2009, los resultados que obtuvo fueron sorprendente ya que

confirmó la presencia de cromo en el río Alameda precisamente con una concentración elevada en épocas de estiaje con valor de 0,0275 mg/L, y con mínimo valor de 0,0010 mg/L en el 2008. Otro muestreo realizado en el año 2009 dio resultados de la presencia de cromo con una concentración elevada de 0,0192 mg/L y con mínimo valor de 0,0003 mg/L. Mientras termina el tiempo de estiaje y con la llegada de las lluvias la presencia de cromo en el río Alameda disminuye drásticamente con valores de 0,000 mg/L. Las muestras tomadas en el efluente de la PTAR Totorá obtuvo resultados con concentración más altos en comparación con el río Alameda con valores de 0,0340 mg/L y con mínimo valor de 0,0039 mg/L en tiempo de secano o estiaje. En tal sentido, concluye que la central máxima del cromo está en la estación de muestreo RA-04 con valor de 0,01217 mg/L y la concentración con un valor mínimo está en RA-01 de 0,00314 mg/L ambos resultados dados en tiempos de estiaje en el río Alameda.

## **2.2. Bases teóricas**

### **2.2.1. Metales pesados**

El metal pesado es considerado como tal cuando sus pesos atómicos son mayores a 56 y también lo notamos en la tabla periódica, estos metales son muy contaminantes para el suelo y agua, en concentraciones elevadas podría ser perjudicial. (Giraldez, 2019).

Los metales pesados también están presentes en el suelo, estas podrían estar de manera natural como componente del suelo y también puede encontrarse como consecuencia por la contaminación del hombre (actividades antropogénicas). (Prieto J., et al., 2014).

Los metales pesados pueden incluirse a las aguas e incluso a la planta de tratamiento de aguas residuales mediante el alcantarillado por medios de residuos industriales que serán vertidos a la alcantarilla, que después de esta, estos metales serán depositados en la misma

planta de tratamiento de aguas residuales en sus lodos residuales, también en lagos, ríos y cualquier fuente acuática. (Prieto, et al., 2014).

A los metales pesados se debe tener en consideración no solo a la toxicidad, también tener en cuenta el tiempo de residencia en el suelo, ya que este puede estar tranquilamente por miles de años, por este motivo es considerado como un riesgo permanente para la salud humana que viene desde la cadena alimenticia, mientras la toxicidad no ocurre de mismo modo con los plaguicidas o insecticidas que hoy en día se puede encontrar en el suelo como un contaminante común, entonces existe la necesidad de recuperar, descontaminar y sanar suelos que están siendo contaminadas por muchos metales pesados. (Munive, 2018).

### **2.2.2. Cromo**

Es un metal pesado se presenta en forma más estable como Cr (III), también se presenta como Cr (0) y Cr (VI); siendo el cromo hexavalente el más tóxico y dañino. Adicionalmente el cromo (VI) se encuentra en el suelo absorbidos con grupos hidroxilos en las arcillas como en la montmorillnita y caolinita. (Giraldez, 2019).

- **Cromo (VI) en aguas residuales**

En la actualidad el cromo (VI) en las aguas residuales es contaminada severamente por los efluentes que no fueron tratadas previamente antes de su vertido al desagüe municipal, las industrias que los generan son las curtiembres, las cementeras y colorantes como pinturas corrosivas. Los límites máximos permisibles se han dado tanto para efluentes de agua potable y efluentes de las industrias del contenido de cromo (VI), el límite máximo permisible para el agua potable es 0,05 mg/L y para efluentes de las industrias es 0,1 mg/L. Para poder mitigar o reducir este metal se usan diferentes técnicas para su tratado como precipitación, intercambio iónico y adsorción. (Lavado, Rosario, & Recuay, 2013).

La presencia del cromo hexavalente en las aguas residuales industriales ya no es novedad es un contaminante muy frecuente en comparación a las aguas residuales domésticas, este agente contaminante proviene de pintura de cueros o también de la manufactura de pinturas, encurtido de pieles, procesos de galvanoplastia, entre otros, y este ocasiona propiedades carcinogénicas y mutagénicas al ser humano. Por tal motivo es necesario darle un tratamiento convencional de reducir el cromo hexavalente a cromo (III), esta especie es la menos tóxica y menos móvil en el ecosistema, el tratamiento podría realizarse con proceso de precipitación química, con intercambio iónico, con extracción con disolventes, hasta adsorción y este método presenta diferentes materiales adsorbentes usados para la adsorción de metales pesados tal es el caso del cromo, entre ellos los materiales adsorbentes tenemos al óxido de hierro, este desarrolla mucha afinidad a los complejos metálicos y también ciertos iones. (Picazo, et al., 2014).

- **Toxicidad**

Si bien es cierto que el cromo (VI) son consideradas cancerígenas para el ser humano y esto lo certifica la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC). Si bien es cierto que para el consumo de agua debe ser menos a  $2 \mu\text{g/L}$ , pero la realidad es que se han encontrado concentraciones más altas como  $120 \mu\text{g/L}$ . La mayoría de los alimentos son la fuente de ingesta de este elemento. El Cr (III) normalmente no se encuentra en el agua de consumo humano, lamentablemente el agua tratada (clorada) el Cr (VI) tiene mayor presencia. (Abril, 2016).

### 2.2.3. *Cadmio*

El cadmio es un metal pesado muy dañino y tóxico, el envenenamiento se realiza al inhalarlo o ingerirlo, y esta hacen que se formen compuestos complejos acuosos en los que llegan a juntarse de 1 hasta 4 ligandos. (FCEA, 2012).

Este metal es altamente contaminante para el medio ambiente y esto hace que sea un causante de muchas enfermedades al ser humano, el cadmio metal tóxico se retiene en nuestro organismo tal es el caso en el hígado y en los riñones. Este metal como compuesto soluble ( $\text{CdCl}_2$ ) con estado de oxidación (II) son altamente carcinógenos para todo ser vivo y esto lo confirma el Departamento de Salud y Servicios Humanos (DHHS) y de mismo modo la (IARC) la Agencia para la Investigación del Cáncer. (Munive, 2018).

- **Cadmio en aguas residuales**

El cadmio contamina al agua y esta es provocada por las principales actividades del ser humano; las que empiezan desde arrojar sus desechos a las alcantarillas (desagüe); es de mucha importancia que estos contaminantes sean removidos antes de la descarga a los lechos de secado, ya que estos metales pesados pueden acumularse en el lugar final de lodos orgánicos. Si bien es cierto que, el lodo de las aguas residuales puede ser tratados para reducir el contenido de cadmio estabilizando con la cal, una vez estabilizado podría considerarse biosólido para diferentes actividades. (FCEA, 2012).

#### **2.2.4. Plomo**

El plomo es un metal pesado con estados de oxidación de +2 y +4, con estado de oxidación +2 suele formar compuestos. El plomo está ubicado en el grupo (IV A) es anfótero por tal sentido forma sales plumbosas, plúmbicas, también plumbitos y plumbatos. Este metal pesado también se encuentra en ciertos minerales como la galena que es el (sulfuro de plomo) que se extrae como fuente de obtención del plomo para múltiples fines, la anglosita que es el (sulfato de plomo II) y la cerusita (carbonato de plomo). La mayoría de este metal se encuentra en los residuos de múltiples usos y esta se obtiene por reciclado de chatarras como las placas de baterías y en la industria de la soldadura podemos encontrarlo en las

escorias, también en metal para cojinetes y rodajes, así mismo en recubrimientos de cables, etc. (FCEA, 2012).

- **Plomo en aguas residuales**

El plomo contamina al agua no de manera directa, es contaminada por sus sales solubles en el agua que en su mayoría son vertidas de las fábricas de pintura, por alfarerías con esmaltado, en las fábricas de pirotecnia y en la fototermografía, así mismo en la industria de coloración a vidrios o también en industrias productoras de tetraetilo de Plomo que esencialmente se usa en antidetonante en gasolinas y por último en actividades mineras. El plomo también se podría encontrar en el agua potable por el uso de tuberías que contiene plomo y estas por estar expuestas en agua por un buen tiempo tienden a corroerse y más aún en aguas con acidez elevada, también en los accesorios hechos con latón cromado en los grifos, en las casas construidas antes de 1986 tienen aún este tipo de tuberías existentes. (EPA, 2022).

Altas concentraciones de este metal pesado llamado plomo en forma de sales solubles, a los peces les genera la formación de una película coagulante y también genera alteraciones hematológicas. En el ser humano provoca el envenenamiento con plomo a causa de que el ser humano ingiere agua de tuberías hechas de material de plomo y este genera enfermedades de trastornos nerviosos, así como digestivos y renales.

La Organización Mundial de la Salud (OMS) incita que, para los niños, la cantidad de plomo en la sangre no debería exceder los 30 mg/100 mL de sangre y para los adultos los 40 mg/100 mL de sangre, si fuera el caso de exceder el nivel de plomo se debe tomar medidas drásticas para su tratamiento. (FCEA, 2012).

En tabla 1 se aprecia los efectos en la salud humana por intoxicación con metales pesados.

**Tabla 1**

*Efectos en la salud humana por metales pesados*

<b>Metal pesado</b>	<b>Efecto en la salud</b>
<b>Cr</b>	Carcinogénico, causa pérdida del cabello.
<b>Cd</b>	Carcinogénico, causa falla renal y anemia crónica.
<b>Pb</b>	Causa problemas en los niños reduce la inteligencia, discapacidad del aprendizaje, causa fallo renal.
<b>Zn</b>	La sobredosis de este metal puede causar mareo y fatiga.
<b>As</b>	Causa alteración de la piel como escurrimiento de la piel, también puede generar cáncer a la piel.
<b>Cu</b>	Niveles elevados de este metal causan daño al cerebro y al riñón generando cirrosis hepática y irritación estomacal.
<b>Hg</b>	Causa depresión, ansiedad, cambios de humor, pérdida de equilibrio, pérdidas de memoria, úlceras y daños en el cerebro.

*Nota:* (Bayón, 2015).

### **2.2.5. Biosólidos**

Se define como materiales orgánicos con alto contenido de nutrientes que se obtienen del tratamiento de las aguas residuales domésticas en una planta de tratamiento. El biosólido es un recurso netamente beneficioso, pues son ricos en nutrientes esenciales para la vegetación y son materia orgánica que pueden ser almacenadas para uso como abono, mejorando y preservando las tierras productivas y asimilando el crecimiento de las plantas. (Bueno, 2015).

En la figura 1 se aprecia los biosólidos acumulados en los lechos de secado.

### **Figura 1**

*Biosólidos en los lechos de secado*



*Nota:* (Philip, 2021).

Los biosólidos han sido aplicadas al suelo con fines de brindar nutrientes esenciales para el crecimiento y desarrollo de las plantas y estas abundan en los biosólidos como el nitrógeno, fósforo y también los micronutrientes como el cobre y níquel. Los biosólidos también se utiliza como sustituto de los fertilizantes químicos e incluso podría considerarse ventajoso en comparación a los fertilizantes inorgánicos por ser orgánico y esta a la vez son lentos al incorporarse al medio de su biotransformación por las vegetales en crecimiento, debido a que los nutrientes orgánicos no soy muy solubles en el agua y eso hace beneficioso al ser muy lento la lixiviación al agua subterránea o llevadas a las aguas superficiales. (Bueno, 2015).

Los biosólidos antes de ser usados en suelos agrícolas se tiene que estabilizar y secar en camas de arenas, pistas pavimentadas o lechos de secado por tiempo mínimo de 3 meses a una temperatura ambiente mayor de los 0 °C, en la figura 2 se visualiza el secado de biosólidos a la interperie.

**Figura 2**

*Biosólidos secadas a la intemperie*



*Nota:* (Philip, 2021).

La agencia de protección ambiental (EPA) de Estados Unidos ha calculado que, de todas las plantas de tratamiento de aguas residuales, de un promedio de 16 000 plantas se generan un promedio de 7 millones de toneladas de biosólido y de esta el 60 % obviamente una vez tratado se usan con fines de fertilizante en las tierras de cultivo, el 17 % son enterrados en rellenos sanitarios, el 20 % son incinerados y el 3 % son utilizados como relleno de tierra. (Bueno, 2015).

En la figura 3 se visualiza los lodos orgánicos trasladados a los lechos de secado.

**Figura 3**

*Lodos orgánicos trasladados a los lechos de secado*



*Nota:* (Bueno, 2015).

- **Aplicación de los biosólidos a la superficie del terreno agrícola**

Para la aplicación de los biosólidos se debe tener en cuenta algunas características del terreno y del tipo de cultivo a realizar, también se debe saber el contenido de nutrientes de los biosólidos y de la tierra del cultivo de mismo modo sus características físicas tales es el caso importante del porcentaje de sólidos. El pH del suelo del terreno agrícola debe estar en el rango de 5,5 a 7,5 de esta manera se estaría reduciendo al mínimo la lixiviación de los metales y favoreciendo al máximo al crecimiento y desarrollo de las plantas.

El tiempo para poder ser aplicados a terrenos agrícolas resulta más beneficios en temporadas de otoño o al comienzo de la primavera obviamente antes de realizar la siembra, mientras en los bosques la aplicación de los nutrientes pueden realizarse durante el crecimiento de las plantas debido a la humedad del terreno. (Bueno, 2015).

En la figura 4 se puede apreciar el cultivo de un vegetal en temporadas de otoño.

**Figura 4**

*Cultivo de la vegetación en temporadas de otoño*



*Nota:* (Bueno, 2015).

- **Contaminación de los biosólidos con metales pesados**

El biosólido tiene alto contenido de nutrientes y esto hace que aumente su biomasa y el buen factor de rendimiento de los vegetales (plantas), pero a veces puede haber detalles en su aplicación en los suelos destinados a la agricultura por el mismo hecho que podría encontrarse metales pesados, estos en cantidad representativa de concentración puede afectar negativamente tanto al suelo y en el proceso de desarrollo de la planta. En tal sentido es necesario un control de las aguas residuales y también de las técnicas de depuración para así disminuir la peligrosidad de los biosólidos. Hoy en día existen 3 técnicas para el manejo de lodos orgánicos de las aguas residuales en Europa, que son la incineración, como uso de

fertilizante en tierras de cultivo y enterramiento dentro de tierra, cada país maneja diferentes técnicas dependiendo de sus leyes establecidas. En España la ley los prohíbe enterrar los lodos orgánicos por el mismo caso de la lixiviación de los metales pesados a las aguas subterráneas y de la misma manera la incineración debió aque en las cenizas contienen metales pesados tóxicos. (Hernández, et al., 2017).

Entonces, la presencia de los metales pesados afecta el uso de biosólidos en la agricultura pero también se tiene que saber que algunos metales son esenciales y necesarios para las plantas tales como el cobre, níquel, hierro, zinc y manganeso debido que la deficiencia o la falta de estas también afecta al crecimiento de dicho vegetal, pero también hay caso que se encuentre en exceso que puede generar la fitotoxicidad. Desde 1990 la legislación de España solo ha permitido el uso de lodos orgánicos en la agricultura dando límites máximos permisibles para 7 metales como Cd, Cr, Cu, Pb, Hg, Ni y Zn, mientras la agencia de protección ambiental de los Estados Unidos regula 10 metales como al Cd, Cr, Cu, Pb, Hg, Ni, Zn, As, Mo y Se. (Hernández, et al., 2017).

#### **2.2.6. Fitorremediación**

Consiste en el uso o apoyo de las plantas para recuperar o remediar in situ o ex situ suelos, sedimentos contaminados con metales pesados para poder eliminarlos del suelo o haciéndolos inocuos para uso en diferentes actividades (Peña, et al., 2014).

La tecnología llamada fitorremediación usa a diversas especies de plantas para poder reducir, remover, degradar, transformar, volatilizar o estabilizar a los contaminantes. Existe gran cantidad de diversidad de especies que se utilizan para la fitorremediación. La mayoría de ellas con capacidad de acumular metales pesados. También están siendo estudiadas las plantas hiperacumuladoras consideras aquellas que pueden acumular hasta más de los 1000

mg/materia seca de níquel, cobalto, plomo y cobre, también de más de 10 000 mg/materia seca manganeso y zinc. (Peña, et al., 2014).

La tecnología de la fitorremediación tiene una bastante acogida como biotecnología emergente debido a las características que presentan como una tecnología sostenible para el futuro. Pese a la existencia de otras tecnologías para la remediación de suelos, la fitorremediación es una técnica emergente con un menor costo en su aplicación, también menor alteración o daño al medio ambiente. (Bayón, 2015).

### ***2.2.7. Las ventajas y desventajas de la fitorremediación***

- **Ventajas**

La fitorremediación es una biotecnología que puede brindar muchas ventajas. La mayor importancia y función es la que realiza tratamientos de descontaminación y por supuesto de baja inversión durante su implementación a largo plazo, mejorando de esta manera la calidad del ambiente reduciendo la erosión que origina al suelo a causa del agua y del viento previniendo que los contaminantes se dispersen al tiempo que mejora la calidad del suelo. La fitorremediación también es ventajosa porque son eficientes su aplicación en áreas grandes con contaminación significativa. (Lifeder, 2022).

Si bien es cierto que los requerimientos energéticos son fundamentalmente elevados, el costo en un proceso de descontaminación, por ende, bajo estas características la fitorremediación brinda mucha ventaja. De mismo modo al usar la fitorremediación de descontaminación in situ, no se necesita trasportar la planta contaminado y así se evita la dispersión ya sea al agua o al aire. (Lifeder, 2022).

- **Desventajas**

Una de las desventajas que presenta son las limitaciones del tiempo, porque los procesos fitorremediadores van a depender de sus características tanto de las plantas y del medio ambiente se acondicionen perfectamente. De igual modo para poder remover hay una limitación a los lugares donde el vegetal tenga acceso a los agentes contaminantes, y esto hace principalmente para que las raíces de las plantas puedan alcanzar los contaminantes para realizar dicha descontaminación real, también son métodos lentos porque desde el momento de la siembra hasta la cosecha transcurre por lo menos 6 meses. (Lifeder, 2022).

Otra de las desventajas de la fitorremediación es la toxicidad que pueda ocasionar al someter a altas concentraciones a las plantas que se usaran para remover dichos metales en el suelo, incluso pueden afectar en su crecimiento o en el proceso fisiológico a las plantas, por tal motivo siempre es necesario saber el nivel y/o concentración del metal en los suelos, agua y tipo de planta a emplearse. Por último, la fitorremediación puede generar efectos negativos en las plantas que pueden ser alimentos para los seres vivos. (Lifeder, 2022).

- **Factores importantes en los procesos de fitorremediación**

En las últimas décadas la gran contaminación tanto suelo y agua ha tenido mucha importancia para resolverlo. En ese sentido surgió nuevas tecnologías capaces de ser eficiente y viables para poder realizar la descontaminación del medio ambiente pero esta realidad solo lo realizan países en desarrollo y una de las alternativas que hoy en día se menciona es la fitorremediación. (Castro, et al., 2022).

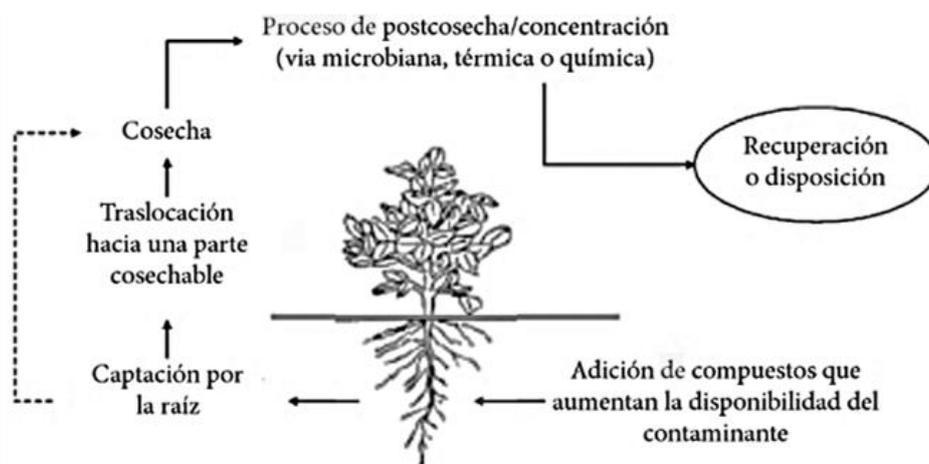
Hay muchas características con las cuales las plantas en proceso biorremediador deben contar para realizar un buen funcionamiento. Algunas de estas se mencionan a continuación:

- 1) Tolerancia al contaminante: es muy importante que el vegetal pueda soportar el contaminante y pueda realizarse o desarrollarse en presencia de este contaminante.
- 2) Capacidad de remediación: tiene que cumplir con la remediación, porque su función y objetivo para la implementación de la fitorremediación es vital.
- 3) Reproducción y crecimiento: el crecimiento de la planta deberá ser rápido para que realice la remoción de los agentes contaminantes y puedan optimizar los procesos de la fitorremediación.
- 4) Resistencia al estrés: las plantas deberán soportar el estado de estrés a causa de las condiciones tanto físicas, químicas y biológicas o climáticas.
- 5) Planta nativa: es mejor usar plantas nativas de la zona para no alterar el ecosistema de dicho lugar.

- **Fitoextracción o fitoacumulación**

La concentración y traslado, lo realizan a través de sus raíces desde el contaminante presente en el suelo hasta las partes cultivables de la planta. Existen plantas hiperacumuladoras que son capaces de almacenar concentraciones de metales de 10 a 500 veces en comparación con otras plantas de esta manera alcanzando de 1 a 5 % del peso seco de la planta.

La fitoextracción remueve los metales pesados de los suelos contaminados, es un nuevo y reciente descubrimiento con aporte muy bueno para la descontaminación. Para este proceso el contaminante (metal pesado) tiene que estar biodisponible para que se realice la absorción a través de la raíz. (Colin, Fuentes, & Saez, 2018). El proceso de fitoextractor se aprecia en la figura 5.

**Figura 5***Proceso fitoextractor*

*Nota:* (Colin, Fuentes, & Saez, 2018).

- **Fitoestabilización**

Al hecho de remover contaminantes que se puedan encontrar en los suelos con la ayuda de diversas especies a través de absorción y/o acumulación en sus raíces, generan la estabilización física del suelo a través de la reducción en la movilidad, toxicidad del contaminante. Se debe tener en cuenta que las plantas que han de usarse con este fin deberán ser plantas no comestibles o en todo caso no sea consumido luego de usarlo como fitorremediador. (Colin, Fuentes, & Saez, 2018).

- **Factor de bioconcentración y traslocación en las plantas acumuladoras**

Para poder hacer los cálculos de la bioconcentración o también conocido como bioacumulador, conocido por sus siglas (BCF o BAF), lo que se realiza es una estimación de la relación de los residuos químicos en las plantas y las concentraciones en suelo donde está la planta. El BCF se calcula dividiendo las concentraciones en la raíz con la concentración restante del suelo, como podemos ver en la siguiente ecuación:

$$BCF = \frac{CB}{CWD}$$

Donde:

BCF: Es el grado en donde ocurre la bioconcentración.

CB: Concentración del metal en la planta (mg/kg).

CWD: Concentración del metal en el suelo (mg/kg).

El factor de traslocación se calcula dividiendo la concentración tanto de tallos, hojas, flores y frutos entre la concentración en la raíz de la planta fitorremediadora, en la siguiente ecuación veremos la relación del cálculo:

$$TF = \frac{CB}{CK}$$

Donde:

TF: Es el factor de traslocación.

CB: Concentración del metal en la parte aérea de la planta (mg/kg).

CWD: Concentración del metal en la raíz (mg/kg).

Entonces gracias a estas ecuaciones tanto la bioconcentración y la traslocación nos indicarán cuál de las plantas usadas en la fitorremediación serán consideradas acumuladora o excluidoras de los metales. En los resultados cuando se tenga un valor de las plantas con  $BCF < 1$  y  $TF < 1$  serán consideradas como plantas acumuladoras o hiperacumuladoras, y las que presentan valores entre 0,1 y 1 serán consideradas plantas tolerantes, mientras las que presentan valores  $< 0,1$  serán consideradas plantas excluidoras. (Castro, et al., 2022).

### 2.2.8. Alfalfa (*medicago sativa*)

Es un vegetal leguminosa forrajera y perenne con hojas trifoliadas de 60 a 90 cm de altura y raíces profundas. Se le conoce como la reina de las forrajeras y sirve para la alimentación de las diferentes especies animales ofreciendo hasta 18 % de proteína. (Carrión, 2013).

En la tabla 2 se aprecia la taxonomía de la alfalfa.

**Tabla 2**

*Taxonomía de la alfalfa (medicago sativa).*

<b>Reino</b>	<b>Vegetal</b>
División	Plantae
Clase	Magnoliophyta
Orden	Magnoliopsida
Familia	Fabales
Género	Medicago
Especie	Medicago sativa

*Nota:* (Abril, 2016).

En la figura 6 se visualiza la planta de alfalfa listo para su cosecha.

**Figura 6**

*Planta de alfalfa (medicago sativa)*



*Nota:* (Abril, 2016).

- **Morfología de la alfalfa (*medicago sativa*)**

- **La raíz**

La planta alfalfa (*medicago sativa*) tiene una raíz muy grande, incontable y situadas a alturas más profundas. Está formada de una raíz fuerte y que se hunde verticalmente en la tierra. Se ha visto que tres meses después haya sido sembrado la raíz puede alcanzar hasta 0,4 m de altura del nivel del suelo. El desarrollo de la adaptación de la raíz de alfalfa va determinar la capacidad de la alfalfa de absorber agua de la altura del nivel del suelo. (Abril, 2016).

- **Tallos y corona**

La edad de los tallos de la alfalfa llega hasta 20 años y esto puede determinar la cantidad de tallos en su fisiología, debido al crecimiento imparale o talvez de los cortes que se realiza para su nuevo crecimiento. Por último, a medida que su desarrollo de la planta entre la parte área y la raíz, la corona de la planta alfalfa almacena o acumula sustancias de reserva, de mismo modo es la sede de yemas. (Abril, 2016).

- **Hojas**

La alfalfa tiene hojas características propiamente dicho, estas están juntas con el tallo y luego se componen de tres folíolos peciolados. En los tallos se encuentran sus hojas de forma aleatoria alternada y surgen en el nudo de los mismos de la planta. (Abril, 2016).

- **Flor y fruto**

A partir del mes de junio la alfalfa comienza a florecer, debido a que el tallo se obtiene o se desarrolla de la yema del cuello de la alfalfa y el color de sus flores es violeta. (Abril, 2016).

En la figura 7 se visualiza la morfología de alfalfa.

### **Figura 7**

#### *Morfología de la planta*



*Nota:* (Abril, 2016).

- **¿Cuándo se debe sembrar la alfalfa?**

En las regiones del Perú hay épocas para el cultivo de la alfalfa:

**Siembra bajo riego:** La siembra empieza en el mes de agosto y se prolonga hasta mediados del mes de diciembre.

**Siembra en secano:** La siembra en secano es variable porque va dependiendo de la presencia de las primeras lluvias continuas que se inician entre los meses de noviembre y diciembre y se prolonga hasta fines del mes de enero.

Luego de este periodo es muy riesgoso; pero se puede proteger con paja contra las granizadas y heladas. (Carrión, 2013).

En la figura 8 se puede apreciar la siembra de alfalfa en temporada de secano.

### **Figura 8**

*Siembra de alfalfa en secano*



*Nota:* (Carrión, 2013).

- **¿Cuánta semilla se necesita para el cultivo?**

La siembra de la semilla se realiza con el apoyo de una máquina sembradora se utiliza 15 kg/ha, y si ésta se ejecuta en forma manual (al voleo) se debe utilizar 25 kg/ha.

- **¿Cómo se realiza la siembra?**

La técnica de siembra puede realizarse de dos maneras por mecánica (usando una sembradora) o manual.

**Siembra con la técnica de voleo:** Se realiza echando semillas de manera que caiga parejo y uniforme en las superficies del suelo preparado para la siembra.

**Siembra en líneas o surco:** Se esparce las semillas al fondo o a los costados de las líneas de manera pareja y continua. (Carrión, 2013).

La figura 9 muestra la siembra de alfalfa en surco.

### **Figura 9**

*Alfalfa sembrada en surco*



*Nota:* (Carrión, 2013).

- **Presencia de metales pesados en la alfalfa**

La planta alfalfa se cultiva en diferentes lugares y suelos, muchos autores afirman la existencia de los metales pesados en la alfalfa por su capacidad de absorber o bioacumular. Si bien es cierto que también es alimento importante para el ganado a nivel mundial, pero la necesidad de determinar su capacidad de este vegetal en acumular o transferir metales desde

su raíz a la cadena alimenticia para uso en la remediación de suelos contaminados. La alfalfa para que pueda capturar los metales pesados usa el proceso biológico llamado la inmovilización y esta lo realiza sus raíces dando como eficiencia de recuperación entre 80 – 90 % del metal pesado. (Quishpe, 2016).

### ***2.2.9. Técnicas de determinación de metales pesados***

La técnica más usada para la determinación de metales pesados es la espectroscopia de absorción atómica, que se fundamenta en una fuente de átomos elementales que andan electrónicamente activos por la luz monocromática, y esta hace que absorba y mida el elemento químico por el instrumento. (Mendoza, 2020).

La otra técnica más usada para determinar muchos metales pesados es la de Espectroscopía de emisión atómica con Plasma de Acoplamiento inductivo más conocido por sus siglas (ICP-OES), esta técnica es capaz de poder determinar y cuantificar gran cantidad de elementos de la tabla periódica excepto a los orgánicos como (C, N, O, H, F) y gases nobles y obviamente con un límite de concentración que va desde % hasta ppb (g/L). Dichas muestras para ser analizadas son introducidas en forma líquida necesario para su respectivo análisis. (CSIC, 2019).

### ***2.2.10. Factores de concentración de los metales pesados***

Existe variables y referencia que indican la tendencia que tienen los vegetales en la absorción y de la misma manera la traslocación de los metales pesados del suelo hacia las partes de la planta como: a las hojas, tallos y semillas o sea a la parte aérea de la planta y estos factores son:

- **Factor de bioconcentración**

Como el nombre lo dice mide la concentración del metal pesado captado ya sea por la raíz o por la parte aérea de la planta. También se utiliza para poder medir la eficiencia de

la acumulación de los metales pesados en la biomasa radicular y la parte aérea, entonces si el factor de bioconcentración presenta valores menores a 1 indicaran que dicha especie son hiperacumuladoras, y si presentan valores mayores que 1 están considerados como excludoras. (Mendoza, 2020).

### ***2.2.11. Estándares de calidad ambiental***

También conocidas por sus siglas ECAS, estas presentan reglas que establecen la cantidad y proporción de la concentración o dicho de otra manera la eficiencia o grado de los minerales, el agua, aire y suelo son receptores que en están ubicadas las sustancias con sus características y propiedades físicas, químicas y biológicas, no generan ningún riesgo de mucha importancia a la población igual modo para el medioambiente. De acuerdo a la característica y propiedades que se va tratar, tanto de la acumulación o nivel será tomada en cuenta en las categorías de rangos o niveles máximos o mínimos (LMP). (Mendoza, 2020).

- **Estándares de calidad ambiental para suelos**

Los ECA para suelo establecen un referente obligatorio tanto para ver el diseño y aplicación de los instrumentos que serán usadas en la gestión ambiental, y serán aplicadas para los parámetros asociados a las actividades productivas, extractivas y de servicios. Mediante el Decreto Supremo N° 011-2017 Ministerio del Ambiente (MINAM, 2017) los estándares de calidad ambiental para los suelos contaminados se pueden apreciar en la siguiente tabla 3. (MINAM, 2017).

**Tabla 3***Estándares de calidad ambiental para suelos contaminados*

Parámetros en mg.kg <sup>-1</sup> PS	Uso de suelo			Métodos de ensayo
	Agrícola	Residencial/ parques	Comercial/ Industrial/Extra activo	
Arsénico	50	50	140	EPA 3050 EPA 3051
Bario total	750	500	2 000	EPA 3050 EPA 3051
Cadmio	1,4	10	22	EPA 3050 EPA 3051
Cromo total	-	400	1 000	EPA 3050 EPA 3051
Cromo VI	0,4	0,4	1,4	EPA 3060 EPA 7199 o DIN EN 15192
Mercurio	6,6	6,6	24	EPA 7471 EPA 6020 o 200.8
Plomo	70	140	800	EPA 3050 EPA 3051
Cianuro libre	0,9	0,9	8	EPA 9013 o ASTM D7237 y/o ISO17690:2015

(MINAM, 2017)

**2.3. Marco conceptual****• Contaminación**

La contaminación es el resultado de las distintas acciones que realiza el hombre, de esta manera son los causantes de los diversos tipos de contaminación superando el límite

máximo permisible, sin saber que estos materiales tóxicos y nocivos tienden a acumularse en el ambiente. (Mendoza, 2020).

- **Biosólidos**

Son los lodos orgánicos deshidratado que se generan en una planta de tratamiento de aguas servidas, se usa en la agricultura como abono orgánico por su contenido rico en micronutrientes el cual son principalmente causante de su crecimiento y desarrollo de una buena planta. (Fuentes, Isenia, & Ascencio, 2017).

- **Biotecnología**

Es el uso de organismos vivos y bacterias. mediante una técnica o métodos con fines son producidos en la etapa secundario en una planta de tratamiento de aguas servidas, estas son provenientes de las unidades de filtros percoladores o lagunas de estabilización, son producto de las concentraciones de sólidos que han sido removidos de las aguas residuales. (Anta, 2020).

- **Humedad**

El contenido de humedad hace referencia al contenido mínima de agua en un sólido, pero en el secado de sólidos es más conveniente referir la humedad sobre base seca. (Oryan, 2016).

- **pH**

El potencial de hidrógeno más conocido como (pH). Sirve como para dar la medida y determinar el grado de basicidad o acidez de una solución. (Bonilla, 2018).

- **Remoción**

También llamado remover o reducir, se utiliza para hacer referencia a todo aquel acto que tenga ver con quitar algo de su lugar. (Mayta & Mayta, 2017).

#### • **Lechos de secado**

También llamado cancha de secado, actualmente usado para la deshidratación de los lodos residuales por lixiviación una vez retira el biosólido se puede almacenar o votar a los vertederos, de misma manera se puede usar en la agricultura. (Castellanos, et al., 2018)

## **2.4. Marco legal**

En la que se encuentra la Ley N° 31189, ley para fortalecer la Prevención, Mitigación y atención de la Salud afectada por la contaminación con metales pesados y otras sustancias químicas.

- DECRETO SUPREMO N° 037-2021-MINAM, Plan Especial Multisectorial para la Intervención Integral a favor de la Población expuesta a Metales Pesados, Metaloides y otras sustancias químicas tóxicas.
- DECRETO SUPREMO N° 010-2019-VIVIENDA, reglamento de valores máximos admisibles (VMA) para las descargas de aguas residuales no domesticas en el sistema de alcantarillado sanitario.
- DECRETO SUPREMO N° 003-2010-MINAM, Límites Máximos Permisibles para los efluentes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales.
- DECRETO SUPREMO N° 011-2017-MINAM, Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Suelo.
- DECRETO SUPREMO N° 020-2021-MINAM, Plan de Estándares de Calidad Ambiental (ECA) y Límites Máximos Permisibles (LMP) para el periodo 2021-2023.

## CAPÍTULO III

### DISEÑO METODOLÓGICO

#### 3.1. Tipo y nivel de investigación

Este trabajo de investigación es de tipo aplicada y el nivel de alcance es explicativo.

#### 3.2. Diseño de investigación

El diseño de este experimento fue completamente randomizado o al azar (DCR), para ello se ha utilizado tres macetas M1, M2 y M3 de la misma variedad de planta, pero de densidades diferentes de siembra y 2 macetas de variedades diferentes a una misma densidad, que a mayores detalles se muestra en el ítem 3.7.2. el área, la variedad y las densidades de siembra se muestran en la tabla 4. Se usaron semillas de la variedad master10, donde estas fueron instaladas respetando y cumpliendo el protocolo de las buenas prácticas agrícolas y se ha evaluado la fitoextracción con la ayuda de alfalfa a los metales pesados de diferentes densidades de la biomasa tanto menor, medio y mayor con dicha planta fitoextractora. Previamente se ha realizado tomas de muestras de los biosólidos antes y después de la cosecha, para su análisis químico instrumental por ICP-OES. El tiempo para la cosecha de alfalfa (*Medicago sativa*), se ha llevado a cabo al sexto mes después del sembrado, finalmente se procedió a la deshidratación de las muestras para su correspondiente análisis.

**Tabla 4***Características de las macetas experimentales*

	<b>Macetas A</b>			<b>Macetas B</b>	
	M1	M2	M3	M4	M5
<b>Área</b>	0,0269 m <sup>2</sup>				
<b>Densidad</b>	20 kg/ha	25 kg/ha	30 kg/ha	25 kg/ha	25 kg/ha
<b>Variedad</b>	Master 10	Master 10	Master 10	California	Moapa

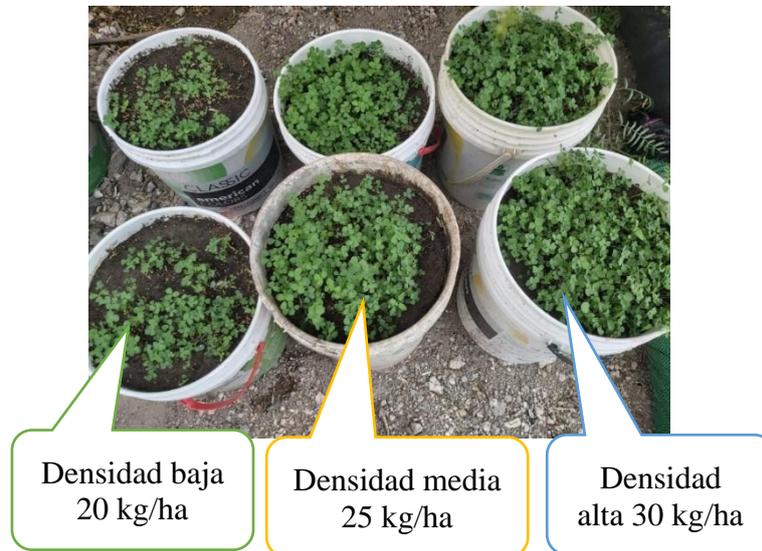
En la figura 10 se visualiza la semilla de las distintas variedades de alfalfa.

**Figura 10***Variedades de alfalfa usada en la investigación*

En la figura 11 se aprecia la variedad de alfalfa, master10 sembrada a diferentes densidades.

### Figura 11

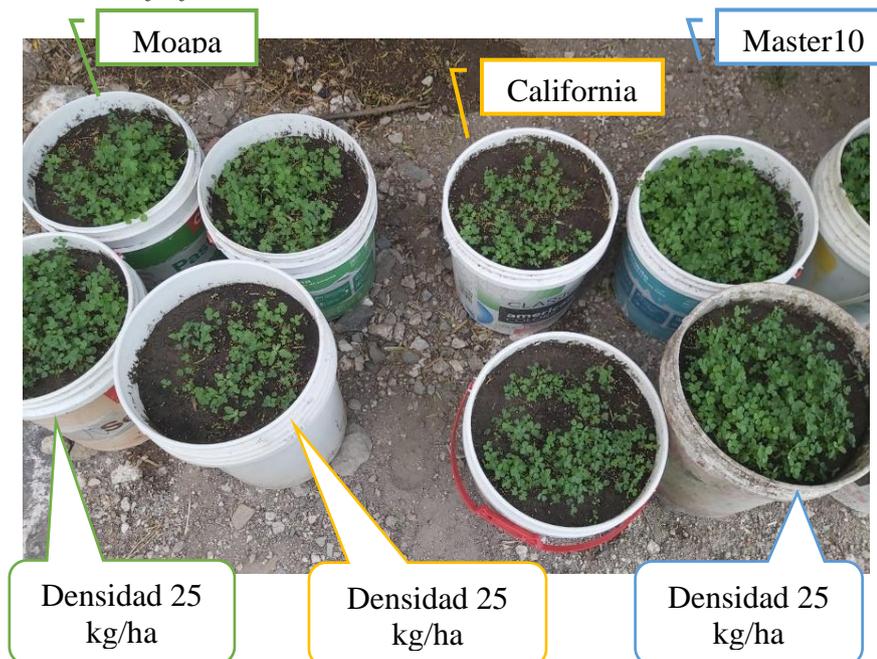
*Variedad de alfalfa master10 sembrada a diferentes densidades*



En la figura 12 se visualiza las variedades de alfalfa sembrada a una sola densidad.

### Figura 12

*Variedades de alfalfa sembrada a una sola densidad*



### 3.3. Población, muestra y muestreo

#### 3.3.1. Población

- La población para este trabajo de investigación son los biosólidos residuales de la PTAR La Totorá.

#### 3.3.2. Muestra

- Macetas experimentales con cultivo de alfalfa (*medicago sativa*).

#### 3.3.3. Muestreo

El tipo de muestreo fue aleatorio simple, la toma de muestras se realizó de la mezcla (biosólido más tierra) del macetero y de las plantas (raíces y parte aérea), procedentes de las 3 macetas experimentales de las diferentes densidades consideradas (M1, M2, M3) y de mismo modo de las últimas macetas que están sembradas a la misma densidad con diferentes variedades (M4 y M5), se señaló los puntos tomadas para la muestra de la mezcla (biosólido más tierra) y del mismo punto se recolectó dichas plantas de las (M1, M2, M3, M4 y M5) de la PTAR La Totorá en la región de Ayacucho.

### 3.4. Variables e indicadores

Variable Independiente (X)

X1 = Alfalfa en la fitorremediación para biosólidos acondicionado con tierra.

X2 = Densidad de alfalfa en los biosólidos acondicionados con tierra.

Indicadores

- Variedad de alfalfa (especie).
- Cantidad de la planta alfalfa por unidad de área (kg/m<sup>2</sup>).

Variable dependiente (Y)

Remoción de metales pesados de los biosólidos residuales acondicionados con tierra.

Indicadores

Y1 = Concentración de metales pesados (mg/kg) en los biosólidos residuales acondicionados con tierra.

Y2 = Porcentaje (%) de remoción de metales pesados.

### 3.5. Operacionalización de las variables

En la tabla 5 se puede apreciar la operacionalización de variables de la investigación.

**Tabla 5**

*Operacionalización de variables*

<b>Variables</b>	<b>Dimensiones</b>	<b>Concepto</b>	<b>Indicadores</b>
<b>operacional</b>			
X	X <sub>1</sub>		X <sub>11</sub>
<b>Variable independiente</b>	Alfalfa en la fitorremediación para biosólidos acondicionado con tierra.	Es el tipo de alfalfa para la remoción de los metales pesados contenido en la mezcla de tierra y biosólido residual.	Variedad de alfalfa (especie).
	X <sub>2</sub>		X <sub>21</sub>
	Densidad de alfalfa en los biosólidos acondicionados con tierra.	Es una magnitud que expresa la cantidad de alfalfa en el biosólido residual.	Cantidad de la planta alfalfa por unidad de área (kg/m <sup>2</sup> ).
Y	Y <sub>1</sub>		Y <sub>11</sub>

**Variable dependiente** Concentración de metales pesados en los biosólidos residuales acondicionados con tierra. Cantidad de metal pesado retirado en relación al biosólido acondicionado con tierra. Cantidad de (mg de metal pesado / kg de biosólido acondicionado con tierra).

Variables	Dimensiones	Concepto operacional	Indicadores
	Y <sub>2</sub>		Y <sub>21</sub>
	Porcentaje (%) de remoción de metales pesados.	Porcentaje de remoción de los metales pesados de los biosólidos acondicionados con tierra.	Porcentaje de remoción de los metales pesados (%).

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

La técnica utilizada fue la observación, monitoreo en campo, análisis de contenidos, revisión bibliográfica.

A través de la observación se identificaron la disposición final de los biosólidos de la PTAR La Totorá, mientras el monitoreo en campo se realizó desde la siembra de alfalfa en los biosólidos acondicionados con tierra, hasta el tiempo de cosecha. El contenido de los metales pesado se realizó en los biosólidos residuales antes de la siembra de alfalfa y después de ello. Así mismo, se cuantificó en la raíz y parte aérea de la alfalfa.

### **3.6.1. Acopio y procesamiento de datos**

Para la toma de datos de la presente investigación, se realizó antes y después de la siembra de alfalfa (*medicago sativa*) en los biosólidos acondicionados con tierra sembradas en las macetas, como se indica en el ítem 3.7.2.

### **3.6.2. Materiales usada en la presente investigación**

- Bolsas polipropileno para muestras
- Plumones
- Pico
- Pala
- Papel para rotulado
- Frascos de polietileno
- Costales
- Baldes de 20 L para macetero
- Malla N° 2 mm
- Cuadernillo de apuntes
- Cinta de embalaje
- Sobre manila
- Guantes de látex

### **3.6.3. Equipo y/o instrumentos usados en la investigación**

- ICP-OES PerkinElmer
- Balanza digital Coretto EC30 100K (0,01-100) kg
- Balanza gramera digital Camry 5K (1-5000) g
- Laptop HP Intel Core i5
- Cámara fotográfica Canon EOS Rebel T100
- Flexómetro 8 m Stanley

### 3.7. Procedimientos para la recolección de datos

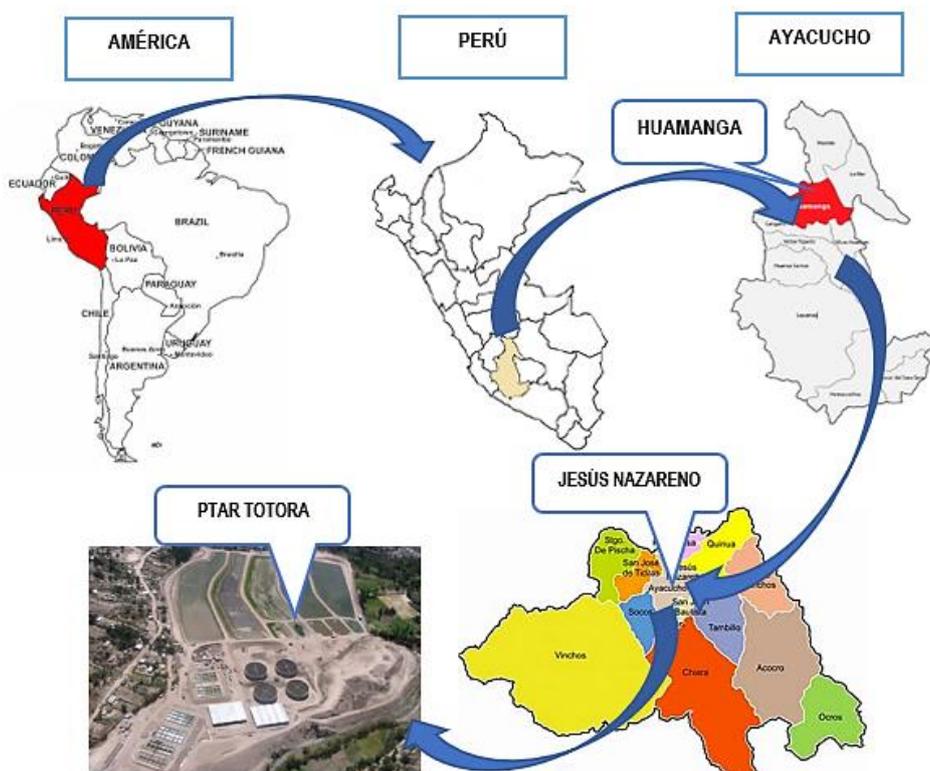
#### 3.7.1. Ubicación y descripción del área de estudio

Se realizó las gestiones correspondientes para el acceso y uso del campo (lechos de secado) de la PTAR la Tatora de SEDA AYACUCHO.

La planta de tratamiento de aguas residuales “la Tatora”, se encuentra ubicada en el distrito Jesús Nazareno, en la provincia de Huamanga del departamento de Ayacucho, ubicada a una altitud de 2610 m.s.n.m. La figura 13 muestra la localización de la PTAR “la Tatora”.

**Figura 13**

*Localización de la PTAR “la Tatora”*



La investigación realizó en siete meses, de septiembre de 2022 a abril de 2023.

En el mes de septiembre se ha realizado la distribución y acondicionamiento de los

biosólidos del lecho de secado de la planta de tratamiento de aguas residuales “la Totora”, en mes de octubre se ubicó el espacio para las macetas de dicho experimento y a finales de octubre se empezó con la siembra de alfalfa (*medicago sativa*), con fines de remover los metales pesados de los biosólidos en la PTAR.

La implementación de las macetas para la siembra de alfalfa (*medicago sativa*), se ha instalado en la unidad y/o etapa secundario de la PTAR “la Totora”, entre los tanques imhoff y los lechos de secado de lodos, como se aprecia en la figura 14.

**Figura 14**

*Ubicación de la instalación de las macetas*



Nota: Google Earth Pro

La investigación consta de 5 etapas:

- Etapa 1: Determinación de la concentración de los metales pesados de los biosólidos retirados de los lechos de secado.
- Etapa 2: Ubicación e instalación de las macetas para los biosólidos acondicionados con tierra y la siembra de alfalfa (*medicago sativa*).
- Etapa 3: Funcionamiento del efecto de remoción del metal pesado con la siembra de

alfalfa (*medicago sativa*).

- Etapa 4: Evaluación de la concentración de los metales pesados después de utilizar la alfalfa (*medicago sativa*).
- Etapa 5: Procesamiento de información.

### **3.7.2. Descripción de la siembra de alfalfa**

Se instalaron 3 macetas (M1, M2 y M3) para una sola variedad de alfalfa (*medicago sativa*) llamada master10, las tres macetas estan distribuidas en áreas iguales como se aprecia en la tabla 3, pero consideradas a diferentes densidades para la siembra de alfalfa (*medicago sativa*), para la primera maceta M1 la semillas fueron sembradas a densidad 20 kg/ha, para la maceta M2 se ha sembrado a densidad 25 kg/ha y para la maceta M3 se ha sembrado a densidad 30 kg/ha, en el manual para siembra de alfalfa se realiza de 15 a 25 kg/ha esta dependera del uso de sembradoras o a mano con la técnica de voleo. (Cáritas Puno, 2013).

La técnica de siembra se consideró el boleó mas no el surcado, debido a que en la técnica de boleó se puede distribuir el espacio o distancia de semilla a semilla y tambien con fines de acumular mayor concentración de metales pesados en sus raices de alfalfa.

En la tabla 6 se muestra las características de la siembra de alfalfa en las macetas.

**Tabla 6***Características de la siembra de alfalfa en las macetas*

	<b>Macetas A</b>			<b>Macetas B</b>	
	<b>M1</b>	<b>M2</b>	<b>M3</b>	<b>M4</b>	<b>M5</b>
Área	0,0269 m <sup>2</sup>				
Densidad	20 kg/ha	25 kg/ha	30 kg/ha	25 kg/ha	25 kg/ha
Variedad	Master 10	Master 10	Master 10	California	Moapa
Fertilización de suelos	<b>Alta</b>	<b>Alta</b>	<b>Alta</b>	<b>Alta</b>	Alta
Fecha de siembra	Octubre 2022				
Fecha de cosecha	Abril 2023				
Tiempo de cosecha	6 meses				

**3.7.3. Preparación de las macetas y siembra**

La siembra de la alfalfa se ha realizado en octubre del 2022 en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales, exactamente entre las unidades de tanques Imhoff y los lechos de secado. Para la dicha siembra se ha realizado de acuerdo a las densidades y variedades de la alfalfa como se puede apreciar en la tabla 6.

En la figura 15 se muestran el recojo de los biosólidos de la planta de tratamiento de aguas residuales “la Totorá”.

**Figura 15**

*Recojo de los biosólidos de la PTAR “La Totora”*



Para la preparación del biosólido acondicionado con tierra se ha realizado con el apoyo de un agrónomo con experiencia en el sembrado de alfalfa (*medicago sativa*) como podemos apreciar en la figura 16, por tal motivo las cantidades a mezclar fueron 45 % de biosólido y 55 % de tierra, debido a que está ya contiene cierta cantidad de nutrientes y usar puro biosólido dañaría a las plantas de alfalfa (*medicago sativa*) en tal sentido se ha realizado los pesados correspondientes como se puede apreciar en la tabla 7 en baldes de 20 litros, que estas a la vez serán consideradas como maceta para la siembra de alfalfa.

En la figura 16 se aprecia la preparación de biosólidos acondicionado con tierra para el experimento.

**Figura 16**

*Preparación de biosólidos acondicionado con tierra para el experimento*



En la tabla 7 se visualiza la preparación de los biosólidos más tierra.

**Tabla 7**

*Preparación de biosólidos más tierra*

N° de balde	Peso de (balde + tierra) (kg)	peso de balde (kg)	peso de tierra (kg)
01	21,55	0,830	20,72
02	21,99	0,840	21,15
03	21,75	0,790	20,96
04	21,55	0,810	20,74
05	21,81	0,840	20,97
	<b>Peso de (balde + biosólido) (kg)</b>	<b>peso de balde (kg)</b>	<b>peso de biosólido (kg)</b>
06	17,58	0,840	16,64
07	18,58	0,840	17,74
08	17,95	0,790	17,16
09	17,66	0,810	16,85
10	18,05	0,780	17,27
		Total	190,20

Mientras en la figura 17 se puede apreciar la preparación de macetas para la siembra de alfalfa.

**Figura 17**

*Preparación de macetas para la siembra de alfalfa*



Una vez cumplido los 6 meses para cosechar la alfalfa (*Medicago sativa*) se ha medido la altura de alfalfa con fines de ver la altura máxima durante el crecimiento y desarrollo de la planta, dando como resultado la altura alcanzada de la planta fue 0,60 m, en la figura 18 se aprecia la medición de la alfalfa.

**Figura 18**

*Medida de la altura de la planta de alfalfa (medicago sativa)*



#### **3.7.4. Obtención de muestras**

Las muestras seleccionadas para el respectivo muestreo de los biosólidos y de la planta alfalfa tanto de la raíz y parte aérea se han realizado de las macetas experimentales a una profundidad de 0 - 35 cm. Se recolectó 1 kg de muestra del biosólido, 1 kg de biosólido acondicionado con tierra antes de la siembra de alfalfa y después de la cosecha de alfalfa se recolectó 1 kg de muestra del biosólido acondicionado con tierra de cada maceta a densidades de 20, 25 y 30 kg/ha, con una sola variedad de master10 y 1 kg de muestra de las macetas de diferentes variedades e igual densidad de 25 kg/ha, de la primera maceta de variedad moapa y de la segunda maceta llamada california, dicho muestreo se realizó aleatoriamente del mismo lugar donde fueron sembradas la alfalfa, también se ha recolectado 20 plantas de cada maceta. Con mayor detalle se puede apreciar en la tabla 8, en la figura 19 se puede apreciar las macetas con siembra de alfalfa.

En la tabla 8 se puede apreciar la toma de muestras de biosólidos, biosólidos más tierra y plantas

**Tabla 8***Toma de muestras de biosólidos, biosólidos más tierra y plantas*

Tipo de muestras	MUESTRAS								TOTAL
	biosólido	biosólido + tierra	M1 25 MOA PA	M2 25 MAS TER 10	M3 25 CALI FOR NIA	M4 20 MAS TER 10	M5 30 MAS TER 10	BLANCO	
(Biosólido + tierra)									
Análisis de metales pesados antes y después de la fitorremediación	1 muestra	1 muestra	1 muestra	1 muestra	1 muestra	1 muestra	1 muestra	1 muestra	8 muestras
Alfalfa (Raíz)									
Análisis de metales pesados después de la fitorremediación			1 muestra	1 muestra	1 muestra	1 muestra	1 muestra	1 muestra	6 muestras
Alfalfa Parte aérea (hojas y tallos)									
			1 muestra	1 muestra	1 muestra	1 muestra	1 muestra	1 muestra	6 muestras
								<b>TOTAL</b>	<b>20</b>
								<b>L</b>	<b>muestras</b>

En la tabla 9 se visualiza la simbología utilizada en el experimento.

**Tabla 9***Simbología utilizada en el experimento*

Descripción	
M1	Maceta 1
M2	Maceta 2
M3	Maceta 3
M4	Maceta 4
M5	Maceta 5
B	Blanco

### ❖ Toma de muestras de los biosólidos y de la mezcla (biosólido más tierra)

Para poder realizar el respectivo análisis de los metales pesados contenidos en los biosólidos y (biosólidos acondicionado con tierra), se tomaron muestras antes del cultivo y después de la cosecha, pero estas antes fueron secadas al irterperie hasta eliminar toda la humedad presente en los biosólidos, luego se ha tomado 1 kg de muestra y se colocaron en bolsas de polipropileno y en bolsas de papel, estas fueron bien selladas y rotuladas como se puede apreciar en la figura 23.

En la figura 19 se aprecia el muestreo del biosólido acondicionado con tierra antes del cultivo.

### Figura 19

*Muestreo del biosólido acondicionado con tierra antes de la siembra*



En la figura 20 se puede apreciar el muestreo del biosólido acondicionado con tierra después de la cosecha.

### Figura 20

*Muestreo del biosólido acondicionado con tierra después de la cosecha*



#### ❖ Toma de muestras de la planta alfalfa (*medicago sativa*)

Para la toma de muestra de la alfalfa (*medicago sativa*) se ha considerado 20 plantas de cada maceta (M1, M2, M3, M4 y M5) para su respectivo análisis de los metales pesados. Para este estudio se ha considerado separar la raíz de la parte aérea de la planta (tallos y hojas) de igual forma fuerón secadas al interperie no mayor a los 30 °C con fines de tener

las hojas y tallos en su misma estructura de la planta como se puede apreciar en la figura 22.

En la figura 21 se puede apreciar la toma de muestras de las plantas de alfalfa.

### Figura 21

*Toma de muestras de las plantas de alfalfa (medicago sativa)*



En la figura 22 se aprecia la deshidratación de las plantas de alfalfa tanto de las variedades de master10, moapa y california.

### Figura 22

*Secado de alfalfa (Medicago sativa)*



Una vez finalizada la toma de muestras y el embolsado de estas, quedan listas para su respectivo análisis de los metaes pesados, de esta manera se realizó el traslado al laboratorio para su respectivo estudio.

En la figura 23 se visualiza las muestras rotuladas listas para el análisis en el laboratorio.

**Figura 23**

*Muestras rotuladas para el análisis en el laboratorio*



### **3.8. Técnicas de procesamiento y cuantificación de datos**

#### ***3.8.1. Cuantificación de metales pesados del biosólido más tierra***

Para la cuantificación de los contenidos de los metales pesados en las muestras sólidas, antes y después de la remoción con alfalfa, han sido detectadas por el método ICP-OES (Plasma acoplado por inducción) con instrucción de ensayo Code VH-ME-ICP4 Análisis por ICP-OES Digestión total, estas fueron analizadas en el laboratorio Actlabs Skyline Perú S.A.C acreditados por SCC Canadá y Certificados por IQNET Y AENOR ISO 9001.

#### ***3.8.2. Cuantificación de metales pesados en la alfalfa (medicago sativa)***

Para la cuantificación de metales pesados en la alfalfa (*medicago sativa*) tanto de la raíz y la parte aérea se llevó a cabo utilizando el método de análisis multielemental por digestión, 2 ácidos, finalización por ICP-OES, estas fueron analizadas en el laboratorio Actlabs Skyline Perú S.A.C acreditados por SCC Canadá y Certificados por IQNET Y AENOR ISO 9001.

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se muestran los resultados que se obtuvieron después del proceso de fitorremediación con la ayuda de la planta alfalfa (*medicago sativa*), sembradas en macetas experimentales que varían desde la densidad de siembra de 30 kg/ha, 25 kg/ha, 20 kg/ha a una sola variedad y con dos variedades distintas, pero a densidades iguales sembradas a densidad 25 kg/ha, todas sembradas con agua potable. También en este capítulo se muestran las discusiones con otros autores realizados temas similares a la remoción de metales pesados del suelo.

#### **4.1. Resultados del contenido de metales pesados**

Los resultados del contenido por ICP- OES de los metales pesados tanto en biosólidos, biosólidos acondicionado con tierra y en las plantas de alfalfa (*medicago sativa*), se ha considerado los valores significativos debido a la mayor concentración acumulativa que podrían presentarse como se puede ver en la tabla 10.

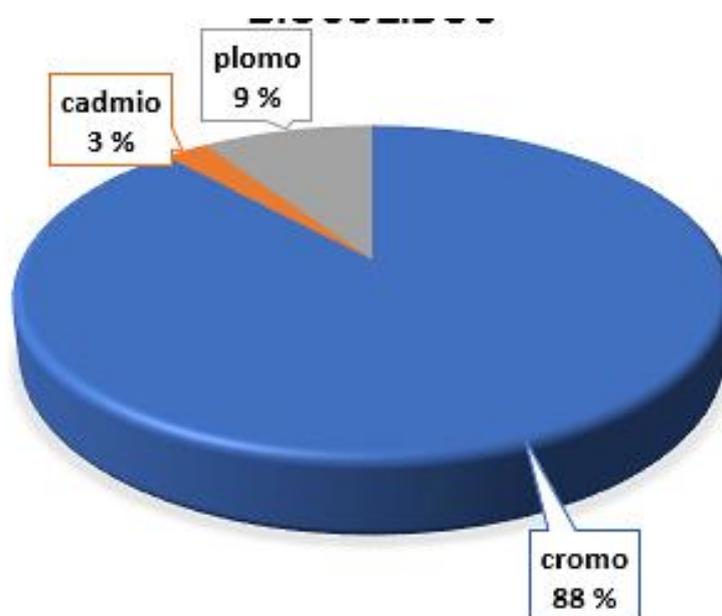
##### ***4.1.1. Respecto al contenido de los metales pesados en los biosólidos***

La investigación inicia con la determinación de la concentración de los metales pesados existentes en los biosólidos de la planta de tratamiento de aguas residuales “la Totorá”, con fines de poder tener información de los contenidos de éstas y que podrían estar por encima de los límites máximos permisibles y con el propósito de dar una solución con la fitorremediación, usando la planta de alfalfa (*medicago sativa*), en la tabla 10 podemos ver los resultados de los análisis del contenido de los metales pesados en los biosólidos, se ha considerado a los metales pesados más tóxicos y por ende los que superan los LMP para uso agrícola.

**Tabla 10***Metales pesados de mayor concentración en los biosólidos*

<b>Metales pesados</b>	<b>Concentración (mg/kg)</b>
Cromo	320,7
Cadmio	7,3
Plomo	37,7

En la figura 24 se visualiza los resultados de los metales en los biosólidos residuales.

**Figura 24***Presencia de metales pesados en los biosólidos residuales*

En la figura 24, se puede apreciar el alto contenido de cromo, que supera al resto de los metales pesados con un porcentaje de 88 % en los biosólidos de la planta de tratamiento de aguas residuales “la Totora”, seguida por el plomo con un 9 % del total y por último el cadmio con 3 %.

De acuerdo a los resultados obtenidos en la figura 24, podemos decir que los biosólidos de la planta de tratamiento de aguas residuales se considera no apto para uso

agrícola, debido al contenido alto de metales pesados, que sería perjudicial para la salud de los seres vivos, estos llegan a superar los límites máximos permisibles estipuladas en el DECRETO SUPREMO N° 020-2021 donde se aprueba el Plan de Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para suelos, para el periodo 2021-2023.

La concentración de estos metales pesados presentes en los biosólidos afecta a la planta de tratamiento de aguas residuales “la Totorá”, esta contaminación se genera en los efluentes de los antiguos encurtidos de pieles que aún existen en nuestra ciudad, de mismo modo la industria de recubrimientos llega a contaminar usando pinturas tóxicas ya sea en diferentes rubros en nuestra ciudad.

#### ***4.1.2. Metales pesados en los biosólidos acondicionados con tierra***

En la tabla 11 se visualiza la presencia de metales pesados en biosólidos acondicionados con tierra, antes de la remoción con la alfalfa.

**Tabla 11**

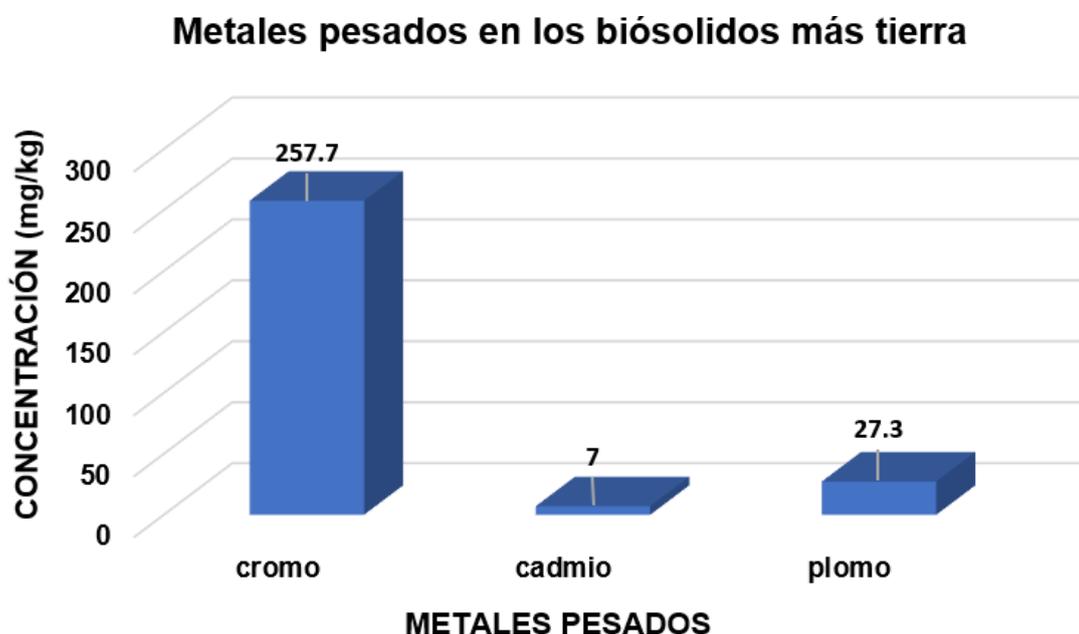
*Metales pesados en biosólidos más tierra antes de la fitorremediación*

<b>Metales pesados</b>	<b>Concentración (mg/kg)</b>
Cromo	257,7
Cadmio	7,0
Plomo	27,3

En la figura 25 se aprecia las concentraciones obtenidas de los metales pesados en los biosólidos acondicionados con tierra.

**Figura 25**

*Metales pesados en los biosólidos acondicionado con tierra*



Para el trabajo de investigación se ha preparado una mezcla entre biosólidos y tierra con mayor detalle se muestra en el ítem 3.7.3. En la figura 25 podemos apreciar que el cromo presenta una elevada concentración de 257,7 mg/kg en los biosólidos más tierra, seguida por el plomo que presenta 27,3 mg/kg y último el cadmio con una concentración de 7 mg/kg, estos valores superan los límites máximos permisibles para uso agrícola estipuladas en el DECRETO SUPREMO N° 020-2021 donde se aprueba el Plan de Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para suelos, para el periodo 2021-2023.

#### ***4.1.3. Cromo en los biosólidos más tierra después del uso de alfalfa***

En la tabla 12 se visualiza la concentración de cromo en las macetas experimentales después del uso de la alfalfa.

**Tabla 12***Cromo en las macetas experimentales después del uso de alfalfa*

	<b>Macetas</b>	<b>Concentración (mg/kg)</b>
<b>1</b>	MACETA 1 - 20 MASTER 10 - M1	199,7
<b>2</b>	MACETA 2 - 25 MASTER 10 - M2	172,7
<b>3</b>	MACETA 3 - 30 MASTER 10 - M3	177,3
<b>4</b>	MACETA 4 - 25 CALIFORNIA - M4	145,7
<b>5</b>	MACETA 5 - 25 MOAPA - M5	160,7

En la tabla 13 se aprecia la presencia de cromo en (%) en las raíces de alfalfa después de la fitorremediación.

**Tabla 13***Cromo en las raíces de alfalfa después de la fitorremediación*

	<b>Variedad</b>	<b>Concentración (mg/kg)</b>	<b>% de remoción</b>
<b>1</b>	M.1 - 20 MASTER 10 (RAÍZ)	58,3	23
<b>2</b>	M.2 - 25 MASTER 10 (RAÍZ)	84,7	33
<b>3</b>	M.3 - 30 MASTER 10 (RAÍZ)	79,3	31
<b>4</b>	M.4 - 25 CALIFORNIA (RAÍZ)	112	43
<b>5</b>	M.5 - 25 MOAPA (RAÍZ)	97,7	38

En la tabla 14 se visualiza la presencia de cromo en los tallos y hojas de alfalfa, después de la fitorremediación.

**Tabla 14***Cromo en los tallos y hojas de alfalfa después de la fitorremediación*

	<b>Variedad de la alfalfa</b>	<b>Concentración (mg/kg)</b>
<b>1</b>	M.1 - 20 MASTER 10 (HOJAS Y TALLO)	<1
<b>2</b>	M.2 - 25 MASTER 10 (HOJAS Y TALLO)	<1
<b>3</b>	M.3 - 30 MASTER 10 (HOJAS Y TALLO)	<1
<b>4</b>	M.4 - 25 CALIFORNIA (HOJAS Y TALLO)	<1
<b>5</b>	M.5 - 25 MOAPA (HOJAS Y TALLO)	<1

- **Factor de bioconcentración del cromo**

El factor de bioconcentración del cromo se calculó usando la siguiente ecuación:

$$BCF = \frac{CB}{CWD}$$

Donde:

BCF: Es el grado en donde ocurre la bioconcentración.

CB: Concentración del metal en la planta (mg/kg).

CWD: Concentración del metal en el suelo (mg/kg).

La concentración de cromo antes de la fitorremediación: 257,7 mg/kg.

En la tabla 15 se puede apreciar el factor de bioconcentración del cromo calculada con la ecuación anterior.

**Tabla 15***Factor de bioconcentración del cromo*

Variedad de la alfalfa	Concentración (mg/kg)	Factor de bioconcentración
M.1 - 20 MASTER 10 (RAÍZ)	58,3	0,23
M.2 - 25 MASTER 10 (RAÍZ)	84,7	0,33
M.3 - 30 MASTER 10 (RAÍZ)	79,3	0,31
M.4 - 25 CALIFORNIA (RAÍZ)	112	0,43
M.5 - 25 MOAPA (RAÍZ)	97,7	0,38

En la tabla 15 podemos apreciar el resultado de la bioconcentración después de la fitorremediación con la planta alfalfa (*Medicago sativa*), donde (Castro, et al., 2022) nos indica que BCF tiene que ser menor a 1, en tal sentido concluimos que la planta alfalfa (*Medicago sativa*) es una planta acumuladora debido a que el factor de bioconcentración está por debajo de 1.

- **Factor de traslocación del cromo**

El factor de traslocación del cromo se calculó usando la siguiente ecuación:

$$TF = \frac{CB}{CK}$$

Donde:

TF: Es el factor de traslocación.

CB: Concentración del metal en la parte aérea de la planta (mg/kg).

CK: Concentración del metal en la raíz (mg/kg).

En la tabla 16 se muestra los resultados del factor de traslocación del cromo

**Tabla 16**

*Factor de traslocación del cromo*

<b>Variedad de la alfalfa</b>	<b>Concentración (mg/kg) en la parte aérea</b>	<b>Factor de traslocación</b>
M.1 - 20 MASTER 10 (HOJAS Y TALLO)	<1	0,017
M.2 - 25 MASTER 10 (HOJAS Y TALLO)	<1	0,012
M.3 - 30 MASTER 10 (HOJAS Y TALLO)	<1	0,013
M.4 - 25 CALIFORNIA (HOJAS Y TALLO)	<1	0,009
M.5 - 25 MOAPA (HOJAS Y TALLO)	<1	0,010

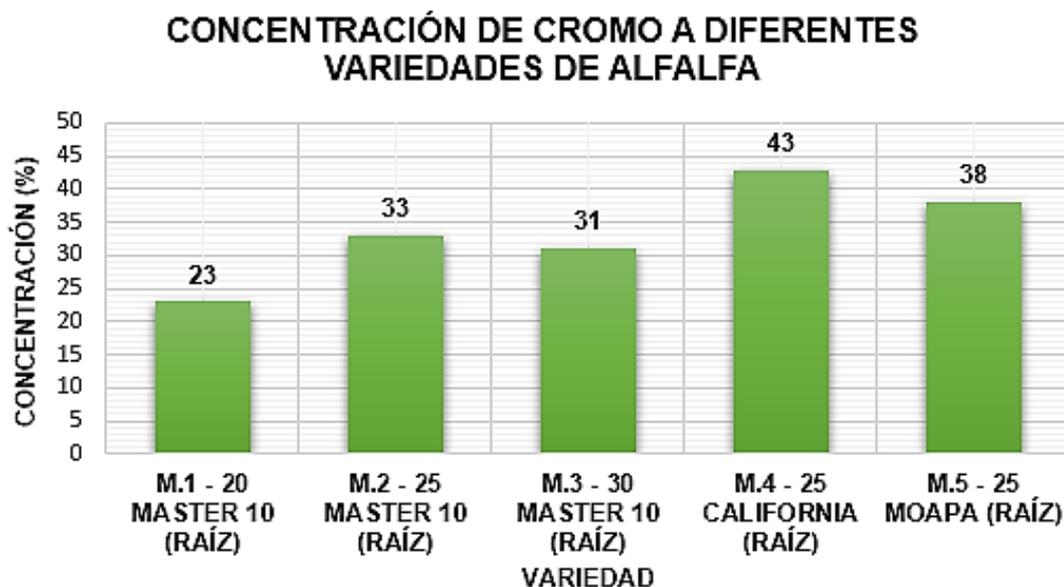
En la tabla 16 podemos apreciar el resultado del factor de traslocación después de la fitorremediación con la planta alfalfa (*Medicago sativa*), la concentración para cada variedad se consideró 1 mg/kg por no tener un dato exacto de dicha concentración, donde (Castro, et al., 2022) nos indica que TF sus valores tiene que estar <1 o entre 1 - 0,1, en tal sentido

concluimos que la planta alfalfa (*Medicago sativa*) es una planta exclusora ósea no transporta el cromo de la raíz a la parte aérea de la planta.

En la figura 26 se muestra la presencia de cromo en las raíces de alfalfa después de la fitorremediación.

**Figura 26**

*Presencia de cromo en las macetas después de la fitorremediación*



Los resultados obtenidos en las macetas después de la fitorremediación se pueden apreciar en la figura 26, donde vemos que en la maceta 4 - 25 california - M4 existe mayor remoción del cromo con un 43 % de remoción en comparación del resto de las macetas, mientras el menor remoción lo presenta la variedad de master10 de densidad 20 kg/ha con un porcentaje de remoción de 23 %, entonces se llega a la conclusión que la mejor variedad que absorbió es la california y de mismo modo solo absorbe en las raíces mas no es absorbido a las partes áreas de alfalfa como se puede apreciar con mayor detalle en la tabla 14, también la densidad de siembra de alfalfa que mayor resultados indica es la de 25 kg/ha.

En el trabajo de investigación realizada por Calderón & Zamudio, (2019), reportan los porcentajes de remoción de acuerdo al tratamiento de concentración de cromo en suelos

contaminados aledaños al río Bogotá, estos tratamientos de cromo fueron realizadas con la planta de *Acasia melanoxylon*. Las concentraciones preparadas con cromo para la fitorremediación fueron de 10 mg/kg, 50 mg/kg y 100 mg/kg, los autores reportan los porcentajes de remoción de 27 %, 39 % y 14 % sucesivamente, dando como mayor porcentaje de remoción de 39 % en sus raíces y menos de 1 % en tallos y hojas, como resultado indican que la planta *Acasia melanoxylon* es bioacumulador en sus raíces y no asimila a las partes aéreas de la planta en el tratamiento de suelos contaminados a concentración de 50 mg/kg, mientras a mayor concentración de cromo en el suelo solo presenta un 14 % de remoción, lo cual indica los autores que a mayor concentración dicha planta no completa su desarrollo en suelos con altas concentraciones debido a la fitotoxicidad de la planta. Mientras en el presente trabajo presenta una remoción de 43 % de cromo en las raíces de la alfalfa de variedad california a densidad de cultivo de 25 kg/ha con un tiempo de corte de 6 meses, de igual modo la concentración en los tallos y hojas de alfalfa son menores a 1 mg/kg de cromo como se puede apreciar en la tabla 14, entonces cabe resaltar que la alfalfa (*Medicago sativa*) es fitoestabilizador de cromo en sus raíces. La concentración de cromo de 145,7 mg/kg en los biosólidos más tierra después de la fitorremediación está por encima de los límites máximos permisibles para uso agrícola estipuladas en el DECRETO SUPREMO N° 020-2021, debido a la alta concentración acumulada en los biosólidos no se pudo extraer en su mayoría el contenido de este metal muy tóxico para la salud y es necesario aplicar dicha planta de alfalfa en el mismo biosólido más tierra hasta bajar la concentración por debajo de los límites máximos permisibles.

#### **4.1.4. Cadmio en los biosólidos más tierra después de la fitorremediación**

En la tabla 17 se visualiza la concentración de cadmio en las macetas experimentales después de la fitorremediación.

**Tabla 17***Cadmio en las macetas experimentales después de la fitorremediación*

	Macetas	Concentración (mg/kg)
1	MACETA 1 – 20 MASTER 10 - M1	3,7
2	MACETA 2 – 25 MASTER 10 - M2	2,7
3	MACETA 3 – 30 MASTER 10 - M3	4,0
4	MACETA 4 – 25 CALIFORNIA - M4	1,2
5	MACETA 5 – 25 MOAPA - M5	3,0

En la tabla 18 se aprecia la presencia de cadmio (%) en las raíces de alfalfa después de la fitorremediación.

**Tabla 18***Cadmio en las raíces de alfalfa después de la fitorremediación*

	Variedades	Concentración (mg/kg)	% de remoción
1	M.1 - 20 MASTER 10 (RAÍZ)	3,3	47
2	M.2 - 25 MASTER 10 (RAÍZ)	3,7	53
3	M.3 - 30 MASTER 10 (RAÍZ)	2,3	33
4	M.4 - 25 CALIFORNIA (RAÍZ)	5,3	76
5	M.5 - 25 MOAPA (RAÍZ)	4,0	57

En la tabla 19 se muestra la presencia de cadmio en los tallos y hojas de alfalfa después de la fitorremediación.

**Tabla 19**

*Cadmio en los tallos y hojas de alfalfa después de la fitorremediación*

	<b>Macetas</b>	<b>Concentración (mg/kg)</b>
<b>1</b>	M.1 - 20 MASTER 10 (HOJAS Y TALLO)	<1
<b>2</b>	M.2 - 25 MASTER 10 (HOJAS Y TALLO)	<1
<b>3</b>	M.3 - 30 MASTER 10 (HOJAS Y TALLO)	<1
<b>4</b>	M.4 - 25 CALIFORNIA (HOJAS Y TALLO)	<1
<b>5</b>	M.5 - 25 MOAPA (HOJAS Y TALLO)	<1

- **Factor de bioconcentración del cadmio**

El factor de bioconcentración del cadmio se calculó usando la siguiente ecuación:

$$BCF = \frac{CB}{CWD}$$

Donde:

BCF: Es el grado en donde ocurre la bioconcentración.

CB: Concentración del metal en la planta (mg/kg)

CWD: Concentración del metal en el suelo (mg/kg)

La concentración de cadmio en los biosólidos más tierra antes de la fitorremediación es: 7,0 mg/kg

En la tabla 20 se visualiza los resultados del factor de bioconcentración del cadmio.

**Tabla 20**

*Factor de bioconcentración del cadmio*

<b>Variedades de alfalfa</b>	<b>Concentración (mg/kg)</b>	<b>Factor de bioconcentración</b>
M.1 - 20 MASTER 10 (RAÍZ)	3,3	0,47
M.2 - 25 MASTER 10 (RAÍZ)	3,7	0,30
M.3 - 30 MASTER 10 (RAÍZ)	2,3	0,33
M.4 - 25 CALIFORNIA (RAÍZ)	5,3	0,75
M.5 - 25 MOAPA (RAÍZ)	4,0	0,57

En la tabla 20 podemos apreciar el resultado del factor de bioconcentración después de la fitorremediación con la planta alfalfa (*Medicago sativa*), donde (Castro, et al., 2022) nos indica que BCF tiene que ser menor a 1, en tal sentido concluimos que la planta alfalfa (*Medicago sativa*) es una planta acumuladora de metales pesados.

- **Factor de traslocación del cadmio**

El factor de traslocación del cadmio se ha calculado de la siguiente manera:

$$TF = \frac{CB}{CK}$$

Donde:

TF: Es el factor de traslocación.

CB: Concentración del metal en la parte aérea de la planta (mg/kg)

CK: Concentración del metal en la raíz (mg/kg)

En la tabla 21 se aprecia los resultados de factor de traslocación del cadmio.

**Tabla 21**

*Factor de traslocación del cadmio*

<b>Variedad de la alfalfa</b>	<b>Concentración (mg/kg) en la parte aérea</b>	<b>Factor de traslocación</b>
M.1 - 20 MASTER 10 (HOJAS Y TALLO)	<1	0,30
M.2 - 25 MASTER 10 (HOJAS Y TALLO)	<1	0,27
M.3 - 30 MASTER 10 (HOJAS Y TALLO)	<1	0,43
M.4 - 25 CALIFORNIA (HOJAS Y TALLO)	<1	0,19
M.5 - 25 MOAPA (HOJAS Y TALLO)	<1	0,25

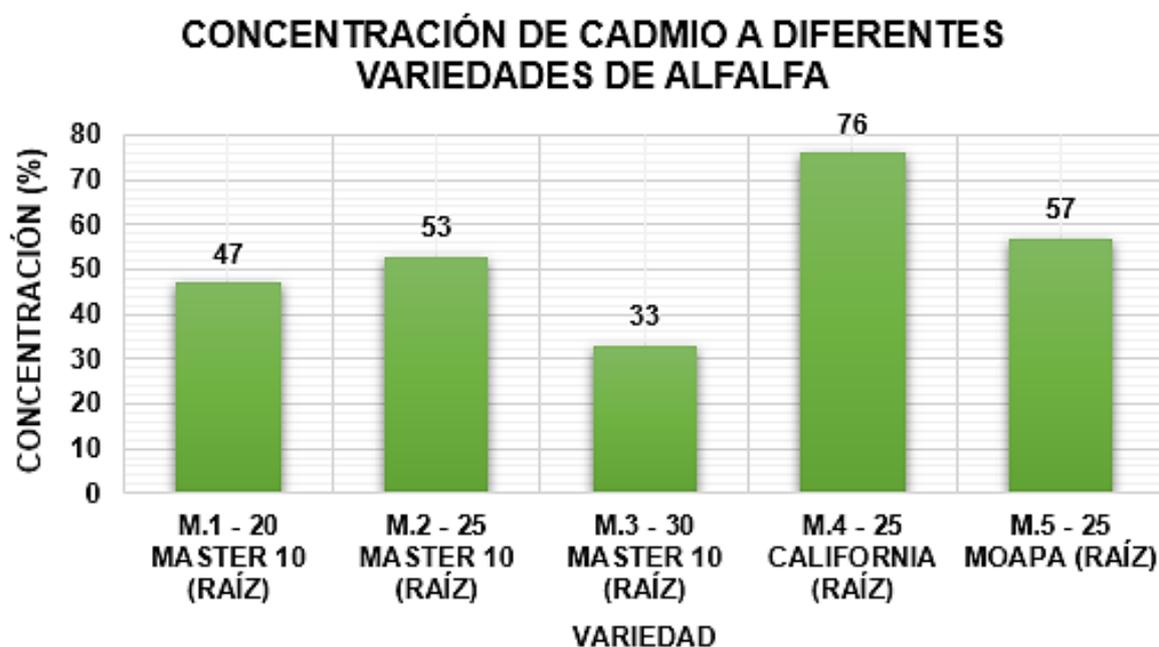
En la tabla 21 podemos apreciar el resultado del factor de traslocación después de la fitorremediación con la planta alfalfa (*medicago sativa*), la concentración para cada variedad se consideró 1 mg/kg por no tener un dato exacto de dicha concentración, donde (Castro, et

al., 2022) nos indica que TF sus valores tiene que estar  $<1$  o entre  $1 - 0,1$ , en tal sentido concluimos que la planta alfalfa (*medicago sativa*) es una planta exclusora ósea no transporta el Cadmio de la raíz a la parte aérea de la planta.

En la figura 27 se muestra la presencia de cadmio en las raíces de alfalfa después de la fitorremediación.

**Figura 27**

*Cadmio en las raíces de alfalfa después de la fitorremediación*



En la figura 27 se aprecia que la maceta 4 - 25 california - M4 existe menor cantidad de cadmio lo que indica mayor remoción con porcentaje de 76 % en comparación del resto de las macetas, donde el menor porcentaje de remoción de 33 % lo presenta la variedad master10 de densidad 30 kg/ha, entonces se llega a la conclusión que la mejor variedad que absorbió es la california y de mismo modo solo absorbe en las raíces mas no en las partes aéreas de alfalfa como se puede ver la tabla 19, también la densidad que mayor resultados indica es la de 25 kg/ha.

Giraldez (2019), reporta que la remoción del cadmio en los suelos degradados por fertilización sintética en la E.E.A El Mantaro logró extraer el cadmio con un porcentaje de remoción de 34 % en su parcela 3 con cultivo de alfalfa de variedad Aragón con densidad de cultivo de 35 kg/ha y con un tiempo de corte de 5 meses, de igual modo indica que la bioasimilación desde las raíces a los tallos y hojas de alfalfa fue menor a 1 mg/kg, tal cual nos indica que no traslada el cadmio a los tallos y hojas de la planta.

Munive (2018), reporta que acumuló un 91 % de cadmio en sus raíces de la planta de maíz y 10 % en los tallos, hojas y frutos, usando como apoyo el vermicompost de Stevia, también usó para la fitorremediación la planta de girasol, demostrando un porcentaje de remoción de 40 % acumulados en sus raíces y 60 % en los tallos y hojas, en ambas plantas no se usa una densidad de cultivo, el menor porcentaje de remoción o bioacumulación lo presenta la planta girasol y además asimila las concentraciones de cadmio de desde la raíz hasta las partes aéreas del girasol aunque esta no es comestible para los seres vivos.

En el presente investigación se logró remover un 76 % de cadmio superando a Giraldez (2019), la causa es la variedad que mayor efecto genera por el lugar de cultivo es la californiana, ya que se sabe que la alfalfa en la región de Ayacucho es casi oriunda y también el otro motivo es que se trata de biosólidos ricos en nutrientes y esto ayuda a mejorar su crecimiento y desarrollo de la planta para su mejor rendimiento con respecto a la extracción del cadmio, también otro factor es el tiempo de corte o cosecha de la alfalfa que se esperó los 6 meses para su cosecha.

#### ***4.1.5. Plomo en los biosólidos más tierra después de la fitorremediación***

En la tabla 22 se visualiza la concentración de plomo en las macetas experimentales después de la fitorremediación.

**Tabla 22***Plomo en las macetas experimentales después de la fitorremediación*

	<b>Macetas</b>	<b>Concentración (mg/kg)</b>
<b>1</b>	MACETA 1 – 20 MASTER 10 - M1	8,3
<b>2</b>	MACETA 2 – 25 MASTER 10 - M2	9,0
<b>3</b>	MACETA 3 – 30 MASTER 10 - M3	11,3
<b>4</b>	MACETA 4 – 25 CALIFORNIA - M4	6,0
<b>5</b>	MACETA 5 – 25 MOAPA - M5	7,3

En la tabla 23 se muestra la presencia de plomo en las raíces de alfalfa después de la fitorremediación.

**Tabla 23***Plomo en las raíces de alfalfa después de la fitorremediación*

	<b>VARIEDAD</b>	<b>Concentración (mg/kg)</b>	<b>% de remoción</b>
<b>1</b>	M.1 - 20 MASTER 10 (RAÍZ)	16,3	59
<b>2</b>	M.2 - 25 MASTER 10 (RAÍZ)	15,3	56
<b>3</b>	M.3 - 30 MASTER 10 (RAÍZ)	12,3	45
<b>4</b>	M.4 - 25 CALIFORNIA (RAÍZ)	19,3	71
<b>5</b>	M.5 - 25 MOAPA (RAÍZ)	16,0	59

En la tabla 24 se aprecia la presencia de plomo en los tallos y hojas de la alfalfa después de la fitorremediación.

**Tabla 24**

*Plomo en los tallos y hojas de la alfalfa después de la fitorremediación*

	<b>Macetas</b>	<b>Concentración (mg/kg)</b>
<b>1</b>	M.1 - 20 MASTER 10 (HOJAS Y TALLO)	2,7
<b>2</b>	M.2 - 25 MASTER 10 (HOJAS Y TALLO)	2,0
<b>3</b>	M.3 - 30 MASTER 10 (HOJAS Y TALLO)	3,3
<b>4</b>	M.4 - 25 CALIFORNIA (HOJAS Y TALLO)	<2
<b>5</b>	M.5 - 25 MOAPA (HOJAS Y TALLO)	3,0

- **Factor de bioconcentración del plomo**

El factor de bioconcentración del plomo se calculó usando la siguiente ecuación:

$$BCF = \frac{CB}{CWD}$$

Donde:

BCF: Es el grado en donde ocurre la bioconcentración.

CB: Concentración del metal en la planta (mg/kg).

CWD: Concentración del metal en el suelo (mg/kg).

La concentración de plomo en los biosólidos más tierra antes de la fitorremediación es: 27,3 mg/kg.

En la tabla 25 se visualiza los resultados del factor de bioconcentración del plomo.

**Tabla 25**

*Factor de bioconcentración del plomo*

<b>Variedades de alfalfa</b>	<b>Concentración (mg/kg)</b>	<b>Factor de bioconcentración</b>
M.1 - 20 MASTER 10 (RAÍZ)	16,3	0,59
M.2 - 25 MASTER 10 (RAÍZ)	15,3	0,56
M.3 - 30 MASTER 10 (RAÍZ)	12,3	0,45
M.4 - 25 CALIFORNIA (RAÍZ)	19,3	0,71
M.5 - 25 MOAPA (RAÍZ)	16,0	0,59

En la tabla 25 podemos apreciar el resultado del factor de bioconcentración después de la fitorremediación con la planta alfalfa (*medicago sativa*), donde (Castro, et al., 2022) nos indica que BCF tiene que ser menor a 1, en tal sentido concluimos que la planta alfalfa (*medicago sativa*) es una planta acumuladora de metales pesados, debido a que los valores del BCF en la tabla 25 están por debajo de 1.

- **Factor de traslocación del plomo**

El factor de traslocación se calculó de la siguiente manera:

$$TF = \frac{CB}{CK}$$

Donde:

TF: Es el factor de traslocación.

CB: Concentración del metal en la parte aérea de la planta (mg/kg)

CK: Concentración del metal en la raíz (mg/kg)

De acuerdo a los cálculos realizados podemos visualizar en la tabla 26 los resultados del factor de traslocación del plomo.

**Tabla 26**

*Factor de traslocación del plomo*

<b>Variedad de alfalfa</b>	<b>Concentración (mg/kg)</b>	<b>Factor de traslocación</b>
M.1 - 20 MASTER 10 (HOJAS Y TALLO)	2,7	0,16
M.2 - 25 MASTER 10 (HOJAS Y TALLO)	2,0	0,13
M.3 - 30 MASTER 10 (HOJAS Y TALLO)	3,3	0,27
M.4 - 25 CALIFORNIA (HOJAS Y TALLO)	<2	0,10
M.5 - 25 MOAPA (HOJAS Y TALLO)	3,0	0,18

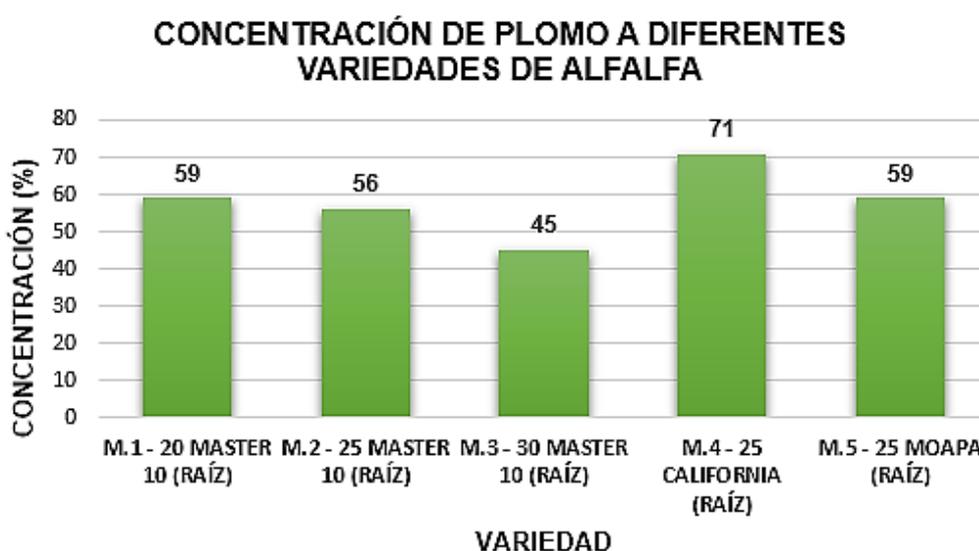
En la tabla 26 podemos apreciar los resultados del factor de traslocación después de la fitorremediación con la planta alfalfa (*medicago sativa*), donde (Castro, et al., 2022) nos indica que TF sus valores tiene que estar <1 o entre 1 - 0,1 para ser considerada exclusiva,

en tal sentido concluimos que la planta alfalfa (*medicago sativa*) es una planta excluyente o sea no transporta el cadmio de la raíz a la parte aérea de la planta, debido a que los resultados del factor de traslocación están por debajo de 1.

En la figura 28 se observa una mejor visualización de la presencia de plomo en las raíces de alfalfa una vez aplicada la fitorremediación.

### Figura 28

*Plomo en las raíces de alfalfa después de la fitorremediación*



La figura 28 muestra que la maceta 4 - 25 california - M4 existe mayor remoción de plomo con un porcentaje de remoción de 71 % en comparación del resto de las variedades, en especial la variedad de alfalfa master10 sembrada a densidad 30 kg/ha que presenta una remoción muy baja de 45 % de plomo, entonces se llega a la conclusión que la mejor variedad que absorbió es la california. Cabe resaltar que la raíz de alfalfa de las tres variedades usadas no son excluyentes de plomo, ósea que no retienen por completo en las raíces, es más, también existe concentraciones en consideración en los tallos y hojas de alfalfa, entonces no es recomendable el uso de la planta de alfalfa para la remoción del plomo

en específico. Ya que como consecuencia no se debería consumir dicho vegetal por los animales por más mínimo que hubiera el contenido del plomo en las partes áreas del vegetal.

Giraldez (2019), reportó niveles de plomo en la planta de alfalfa con un porcentaje de remoción de 25,93 % en el experimento de su parcela 3, cultivada con variedad de alfalfa llamada Aragón y con densidad de cultivo de 35 kg/ha, también reporta que el factor de bioasimilación es menor a 1 mg/kg de cadmio.

Munive (2018), reportó en su trabajo de tesis un porcentaje de remoción y acumulación del plomo en su raíz de 80 % y 20 % en los tallos, hojas y frutos, usando compost de Stevia y a la vez aplicando la fitorremediación con la planta de maíz y sin uso de densidad de siembra, también trabajó con la planta de girasol donde obtuvo una remoción de 55 % acumuladas y fitoestabilizadas en sus raíces, mientras la asimilación del plomo a los tallos, hojas y flores fue de 45 % aunque el girasol no es consumida por el ser humano, esta debe bioacumular por lo menos gran cantidad del metal pesado en las raíces.

Mientras en esta tesis se logró remover 71 % de plomo, esto debido a la variedad de la alfalfa, a la densidad de siembra y por el tiempo de corte de 6 meses, cabe señalar que en este trabajo de tesis existe concentración pequeña en los tallos y hojas superando 1 mg/kg, en tal sentido no es recomendable aplicar la fitorremediación para remover el plomo con la ayuda de la alfalfa, tampoco usar el maíz como lo señala Munive (2018), por ser una planta comestible por el ser humano. La concentración de los biosólidos acondicionados con tierra están por debajo de los límites máximos permisibles para uso agrícola y suelo residencia o parques.

## CONCLUSIONES

1. En la presente investigación inicialmente se determinó la concentración de cromo, obteniendo 320,7 mg/kg, cadmio con una concentración de 7,3 mg/kg y plomo con una concentración de 37,7 mg/kg en los biosólidos de los lechos secado de la planta de tratamiento de aguas residuales la Totorá, de los cuales el cromo y el cadmio presentan valores que superan los límites máximos permisibles para uso agrícola.
2. Se determinó luego del proceso de remoción con la planta alfalfa, las concentraciones de los metales pesados presentes en los biosólidos acondicionado con tierra; siendo para el cromo de 257,7 mg/kg, cadmio de 7,0 mg/kg y plomo de 27,3 mg/kg, mientras en la raíz y parte aérea de la alfalfa se encontró que la mayor acumulación en las raíces se obtuvo con la variedad california y con densidad de 25 kg/ha, cromo presente con una concentración de (112 mg/kg), cadmio (4,0 mg/kg) y plomo (18,7 mg/kg). Mientras en la parte aérea la acumulación de los metales pesados es demasiado bajo, el cromo presenta una concentración  $<1$  mg/kg, mientras el cadmio presenta un valor  $<1$  mg/kg ambos en toda las variedades y densidades, también el plomo presenta un valor muy bajo de  $<2$  mg/kg en la variedad california y de densidad 25.
3. Se determinó el porcentaje de remoción de los metales pesados luego del empleo de la raíz de alfalfa (*medicago sativa*) en la muestra preparada (biosólidos acondicionado con tierra), usando tres variedades distintas de alfalfa y sembradas a diferentes densidades, donde se obtuvo buenos resultados de la remoción de metales pesados con la variedad de california y con densidad de siembra de 25 kg/ha, pudiendo encontrarse al cromo con (43 %), cadmio con (76 %). Por último, el plomo con (71 %).
4. Se concluye que la alfalfa (*medicago sativa*) es una especie fitoestabilizadora de cromo, cadmio y plomo en sus raíces, es una planta exclusora ósea no traslada significativamente al cromo, cadmio y plomo de la raíz a los tallos y hojas, por lo cual

está determinado que la *medicago sativa* es utilizable como planta fitorremediadora para biosólidos o suelos contaminados con metales pesados. Las concentraciones están por debajo de los Límites máximos permisibles después de la fitorremediación tanto del cadmio y plomo mientras el cromo por presentar alta concentración superior a los 100 mg/kg no se encuentra por debajo de los LMP para uso agrícola a pesar de presentar un grado de remoción de 43 %.

## RECOMENDACIONES

1. Se recomienda realizar la evaluación de la fitorremediación o bioacumulación en las raíces de la alfalfa durante un tiempo más largo de lo ya estudiado o volver a plantar en los mismos biosólidos más tierra ya tratados, especialmente para ver la medida de la concentración del cromo hasta estar por debajo de los límites máximos permisibles para uso agrícola.
2. Se recomienda realizar un estudio del uso de otras plantas fitorremediadoras oriundas de la región para la remoción de los metales pesados.
3. Tener en cuenta en la preparación de los biosólidos más tierra para la fitorremediación, debido a que, si se usa más de los 60 % de biosólidos combinado con tierra, esta hará que la planta no pueda desarrollarse bien debido al contenido de nutrientes que lo quemaría a las raíces de la alfalfa.
4. Se recomienda no usar los biosólidos de la planta de tratamiento de aguas residuales la Totorá como abono para la agricultura, previo antes removido los metales pesados presentes.
5. Evaluar las concentraciones de los metales pesados en la planta de tratamiento de aguas residuales “la Totorá” en el afluente y efluente para tener información de la acumulación de estos metales pesados en los biosólidos residuales.

## REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

- Abril, L. (2016). *Análisis comparativo de la velocidad de degradación de cromo VI aplicando fitorremediación en medios físicos diferentes: suelo y agua*. Riobamba, Ecuador: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
- Agudelo, L., Macias, K., & Suárez, A. (2005). Fitorremediación: la alternativa para absorber metales pesados de los biosólidos. *LASALLISTA*, 57,58,59.
- Anta, R. (10/03/2020). *Puntos sobre la innovación*. Obtenido de <https://blogs.iadb.org/innovacion/es/biotecnologia-bioeconomia-desarrollo-america-latina/>
- Aramburu, M., & Trejo, C. (2021). *Tratamiento por electrólisis de NaCl en la remoción de coliformes totales y fecales en lodos residuales del PTAR Ayacucho*. Lima, Perú: Universidad César Vallejo.
- Argandoña, L., & Macias, R. (2013). *Determinación de sólidos totales, suspendidos, sedimentados y volátiles, en el efluente de las lagunas de oxidación situadas en la Parroquia Colón, Cantón Portoviejo, Provincia de Manabí, durante el periodo de Marzo a Septiembre 2013*. Manabí, Ecuador: Tesis, Universidad Técnica de Manabí.
- Aronés, E. (2011). *Evaluación de la contaminación por cromo en el río Alameda de la Provincia de Huamanga*. Ayacucho, Perú: Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga.
- Bayón, S. (2015). *Aplicación de la fitorremediación a suelos contaminados por metales pesados*. Madrid: Universidad Complutense de Madrid.
- Bonilla, A. (2018). *Disponibilidad de nutrientes y el pH del suelo*. intagri.
- Bueno, J. (2015). Beneficios de Lodos Residuales ó Biosólidos. *Agua&ambiente*, 1-2.
- Calderón, D., & Zamudio, A. (2019). *Fitoestabilización de Cromo Hexavalente por *Acacia melanoxylon*; una estrategia para el tratamiento de suelos contaminados*.

- Cundinamarca, Bogotá, Colombia: Universidad Jorge Lozano, Facultad de Ciencias Naturales e Ingeniería.
- Cáritas Puno. (06/08/2013). *Manual para el Cultivo de Alfalfa*. Obtenido de ISSUU: [https://issuu.com/caritas\\_puno/docs/manual\\_alfalfa\\_2009\\_alvaro](https://issuu.com/caritas_puno/docs/manual_alfalfa_2009_alvaro)
- Carrión,P.(06/08/2013).*CáritasPuno*.Obtenidode[https://issuu.com/caritas\\_puno/docs/manu](https://issuu.com/caritas_puno/docs/manual_alfalfa_2009_alvaro)al\_alfalfa\_2009\_alvaro
- Castellanos, J., Merchán, N., Galvis, J., & Manjarres, E. (31 de Septiembre de 2018). *Deshidratación de los lodos en lecho de secado y su influencia sobre la actividad biológica de los microorganismos*. Obtenido de <file:///C:/Users/Hp/Downloads/Dialnet-DeshidratacionDeLosLodosEnLechoDeSecadoYSuInfluenc-7066292.pdf>
- Castro, G., Zárate, R., Vázquez, G., & Hernández, M. (2022). Factores que acondicionan la empleabilidad de las plantas en fitorremediación. *Padi Boletín Científico de Ciencias e Ingenierías del ICBI*, 43- 45.
- Caviedes, D., Muñoz, R., Perdomo, A., Rodríguez, D., & Sandoval, J. (2015). Tratamiento para la remoción de metales pesados comúnmente presentes en aguas residuales industriales. *Revista Ingeniería y Región*, 74,75.
- Chavez, L. (2014). *Fitoremediación con especies nativas en suelos contaminados por plomo*. Lima, Perú.: Universidad Nacional Agraria la Molina.
- Chávez, Y. (2015). *Determinación del contenido de humedad*. Chiclayo,Perú: Universidad Señor de Sipan, Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Urbanismo.
- Colin, J., Fuentes, M., & Saez, J. (2018). *Strategies for Bioremediation of Organic and Inorganic Pollutants*. CRC Press.

- Córdova, A. (2019). *Efluentes de la planta de Tratamiento de Aguas Residuales Totorá y la contaminación de las Hortalizas por metales pesados en la comunidad de Totorá - Ayacucho 2017 - 2018*. Lima, Perú: Universidad Nacional Federico Villarreal.
- CSIC. (2019). *Espectroscopía de emisión atómica ICP-OES*. Instituto de Catálisis y Petroleoquímica.
- EPA. (09 de Diciembre de 2022). *EPA, Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos*. Obtenido de <https://espanol.epa.gov/espanol/informacion-basica-sobre-el-plomo-en-el-agua-potable>
- FCEA.(08/11/2012). *AGUA.org.mx*. Obtenido de <https://agua.org.mx/biblioteca/contaminacion-del-agua-por-metales/>
- Fuentes, N., Isenia, S., & Ascencio, J. (2017). Biosólidos de tratamiento de aguas residuales domésticas, como adiciones en la elaboración de ladrillos cerámicos. *Producción mas limpia*, 94-95.
- Giraldez, L. (2019). *Evaluación de la capacidad fitoextractora de la alfalfa (Medicago sativa) en la remediación de suelos degradados por fertilización sintética en la E.E.A El Mantaro*. Huancayo, Perú.: Universidad Nacional del Centro del Perú.
- González, G. D. (2011). *Fitorremediación: Una herramienta Viable para la Descontaminación de Aguas y Suelos*. Bogotá D.C., Colombia: Universidad de los Andes.
- Hernández, C., Gutiérrez, A., Juan, G., González, D., Rubio, C., Revert, C., . . . Hardisson, A. (2017). Contenido de metales pesados en Isodos de depuradora: estrategia de gestión para una isla oceánica. *SESA Revista de Salud Ambiental*, 5-6.
- Lavado, C., Rosario, M., & Recuay, N. (2013). Remoción de cromo (VI) empleando carbonos preparados por activación química a partir de las astillas de eucalipto. *SciELO*, 2.

- Lifeder. (22/07/2022). *Lifeder*. Obtenido de <https://www.lifeder.com/fitorremediacion/>
- Martell, M. N. (2014). *Acumulación de Metales Pesados en Beta vulgaris L. y Lolium perenne L. de Suelos de Cuemanco*. México D.F., : Universidad Nacional Autónoma de México.
- Mayta, R., & Mayta, J. (febrero de 2017). Remoción de cromo y demanda química de oxígeno de aguas residuales de curtiembre por electrocoagulación. *Scielo*. Obtenido de <https://www.definicionabc.com/general/remocion.php>
- Mendoza, M. (2020). *Capacidad fitorremediadora de la alfalfa Medicago sativa L. en suelos contaminados con plomo evaluada en dos etapas de crecimiento, Végueta, Huaura*. Huaura: Universidad Católica Sedes Sapientiae.
- Mendoza, M. (2020). *Capacidad fitorremediadora de la alfalfa Medicago sativa L. en suelos contaminados con plomo evaluada en dos etapas de crecimiento, Végueta, Huaura*. Huaura, Perú: Universidad Católica sedes sapientiae.
- MINAM. (11 de Enero de 2017). *DECRETO SUPREMO N° 011-2017-MINAM*. Obtenido de [https://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/DGAAH/normas/3\\_NORMAS\\_AMBIENTALES\\_TRANSVERSALES/29.%20Decreto%20Supremo%20N%C2%B0%20011-2017-MINAM.pdf](https://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/DGAAH/normas/3_NORMAS_AMBIENTALES_TRANSVERSALES/29.%20Decreto%20Supremo%20N%C2%B0%20011-2017-MINAM.pdf)
- Munive, R. (2018). *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.
- O1. (2010). *Simposio de Metrologia*.
- Oryan,J.(27/04/2016).*Linked in*. Obtenido de <https://es.linkedin.com/pulse/equivalencia-humedad-base-h%C3%BAmeda-y-seca-rodrigo-o-ryan>

- Paredes, J. L. (2015). *Optimización de la Fitorremediación de Mercurio en Humedales de flujo continuo empleando Eichhornia Crassipes "Jacinto de Agua"*. Tingo Maria: Universidad Nacional Agraria de la Selva.
- Peña, J., Gómez, J., Montoya, H., Chanco, M., Mariano, M., & Cano, N. (2014). Capacidad fitorremediadora de cinco especies altoandinas de suelos contaminados con metales pesados. *SciElo*, 2-3.
- Philip, W. (2021). Uso de Biosólidos en Producción de Hortalizas. *askifas*, 3-5.
- Picazo, N., Soria, M., Carrillo, F., Martínez, A., González, G., & Guajardo, M. (2014). Remoción de Cromo usando como adsorbente residuos industriales. *CienciAcierta, Revista científica, tecnológica y humanística*, 26,27.
- PREVENSYSTEM.(08/05/2020).Obtenidode<https://www.prevensystem.com/internacional/673/noticia-como-nos-afecta-la-presencia-de-metales-pesados-en-los-alimentos.html>
- Prieto, J., González, C., Román, A., & F., P. (2014). Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 29,44.
- Quishpe, K. (2016). *Determinación microbiológica y de metales pesados en jugos de alfalfa (Medicago sativa) usado en la preparación de jugos naturales de fruta, expendidos en los diferentes Mercados del Distrito Metropolitano de Quito*. Quito, Ecuador: Universidad Politécnica Salesiana Sede Quito.
- Rodrigo, T. D. (2018). *Capacidad fitorremediadora de la especie Helianthus annuus mediante la incorporación de enmiendas a suelos contaminados por metales pesados (Plomo, Cromo) de Industrias Metalmecánicas*. Lima, Perú.: Universidad Peruana Unión.

- Salazar, M. (2014). *Fitorremediación de suelos contaminados con metales pesados. Evaluación de especies nativas en la Provincia de Córdoba*. Córdoba, Argentina: Universidad Nacional de Córdoba.
- Utria, E., Reynaldo, I., Morales, D., Morúa, A., & Álvarez, N. (2006). *Caracterización de los bisólidos de Aguas Residuales de la estación Depuradoras de Aguas Residuales "QUIBU"*. La Habana, Cuba: Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas.
- Vega, R. (08/12/2020). *FUSADES*. Obtenido de <http://fusades.org/contenido/que-es-la-biotecnologia>

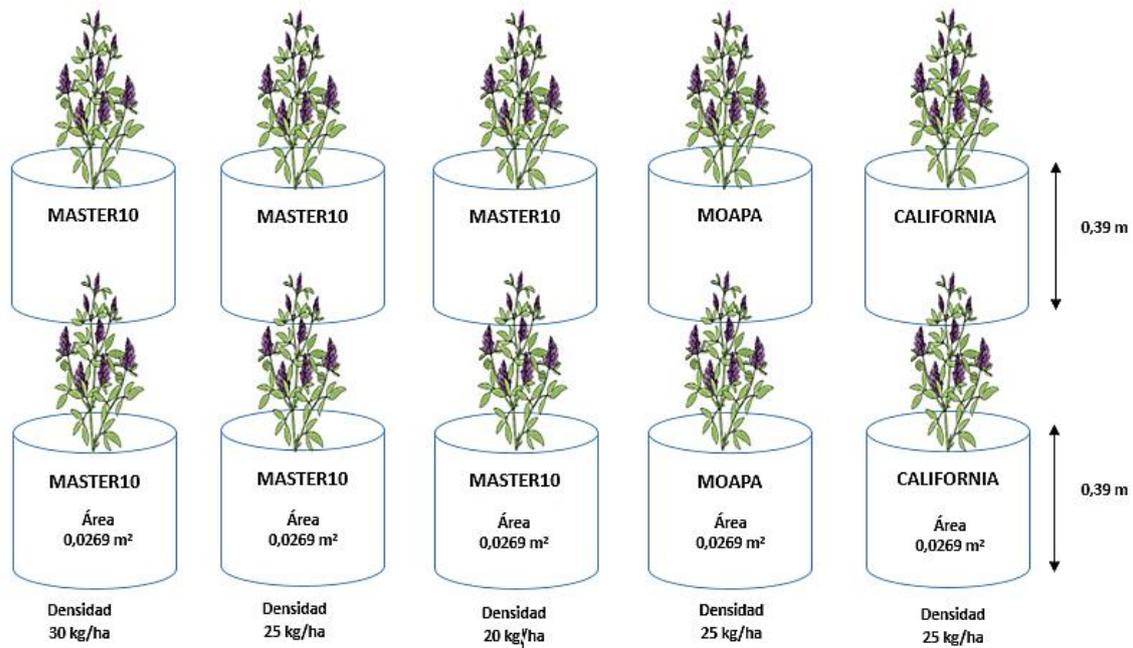
**ANEXOS**

## Anexo 1

### Fotografías del Experimento de investigación en campo

#### Figura 29

Distribución de las macetas para el sembrado de la alfalfa



#### Figura 30

Vigilancia de las macetas experimentales



**Anexo 2**

*Proceso del crecimiento de alfalfa durante los 6 meses*

**Figura 31**

*Siembra de alfalfa una semana después*



**Figura 32**

*Siembra de alfalfa un mes después*

**Figura 33**

*Siembra de alfalfa dos meses después*



**Figura 34**

*Siembra de alfalfa tres meses después*

**Figura**

*Macetas con plantas de alfalfa después de cumplir seis meses*



**Figura 36**

*Cosecha de alfalfa (Medicago sativa)*



**Anexo 3***Resultados de los metales pesados en los biosólidos***Tabla 27***Metales pesados en los biosólidos residuales*

<b>Metales pesados</b>	<b>Informe de ensayo 1 (mg/kg)</b>	<b>Informe de ensayo 2 (mg/kg)</b>	<b>Informe de ensayo 3 (mg/kg)</b>	<b>Promedio</b>
<b>Cromo</b>	321	320	321	320,7
<b>Cadmio</b>	7	7	8	7,3
<b>Plomo</b>	38	38	37	37,7

**Tabla 28***Metales pesados presentes en los biosólidos más tierra*

<b>Metales pesados</b>	<b>Informe de ensayo 1 (mg/kg)</b>	<b>Informe de ensayo 2 (mg/kg)</b>	<b>Informe de ensayo 3 (mg/kg)</b>	<b>Promedio</b>
<b>Cromo</b>	258	257	258	257,7
<b>Cadmio</b>	7	7	7	7,0
<b>Plomo</b>	27	28	27	27,3

Tabla 29

*Cromo en los biosólidos más tierra después de la fitorremediación*

<b>MACETAS</b>	<b>Informe de ensayo 1 (mg/kg)</b>	<b>Informe de ensayo 2 (mg/kg)</b>	<b>Informe de ensayo 3 (mg/kg)</b>	<b>Promedio</b>
MACETA 1 - 20 MASTER 10 - M1	200	200	199	199,7
MACETA 2 - 25 MASTER 10 - M2	172	173	173	172,7
MACETA 3 - 30 MASTER 10 - M3	179	175	178	177,3
MACETA 4 - 25 CALIFORNIA - M4	146	146	145	145,7
MACETA 5 - 25 MOAPA - M5	161	160	161	160,7

Tabla 30

*Cadmio en los biosólidos más tierra después de la fitorremediación*

<b>MACETAS</b>	<b>Informe de ensayo 1 (mg/kg)</b>	<b>Informe de ensayo 2 (mg/kg)</b>	<b>Informe de ensayo 3 (mg/kg)</b>	<b>Promedio</b>
MACETA 1 - 20 MASTER 10 - M1	4	4	3	3,7
MACETA 2 - 25 MASTER 10 - M2	2	3	3	2,7
MACETA 3 - 30 MASTER 10 - M3	3	5	4	4,0
MACETA 4 - 25 CALIFORNIA - M4	1	2	1	1,2
MACETA 5 - 25 MOAPA - M5	2	4	3	3,0

Tabla 31

*Plomo en los biosólidos más tierra después de la fitorremediación*

<b>MACETAS</b>	<b>Informe de ensayo 1 (mg/kg)</b>	<b>Informe de ensayo 2 (mg/kg)</b>	<b>Informe de ensayo 3 (mg/kg)</b>	<b>Promedio</b>
<b>MACETA 1 - 20</b>	8	9	8	8,3
<b>MASTER 10 - M1</b>				
<b>MACETA 2 - 25</b>	9	8	10	9,0
<b>MASTER 10 - M2</b>				
<b>MACETA 3 - 30</b>	11	11	12	11,3
<b>MASTER 10 - M3</b>				
<b>MACETA 4 - 25</b>	6	6	6	6,0
<b>CALIFORNIA - M4</b>				
<b>MACETA 5 - 25</b>	7	8	7	7,3
<b>MOAPA - M5</b>				

Tabla 32

*Cromo en la raíz de la alfalfa después de la fitorremediación*

<b>RAÍZ (ALFALFA)</b>	<b>INFORME DE ENSAYO 1 (mg/kg)</b>	<b>INFORME DE ENSAYO 2 (mg/kg)</b>	<b>INFORME DE ENSAYO 3 (mg/kg)</b>	<b>PROMEDIO</b>
<b>M.1 - 20 MASTER 10 (RAÍZ)</b>	59	57	59	58,3
<b>M.2 - 25 MASTER 10 (RAÍZ)</b>	87	81	86	84,7
<b>M.3 - 30 MASTER 10 (RAÍZ)</b>	79	79	80	79,3
<b>M.4 - 25 CALIFORNIA (RAÍZ)</b>	112	111	113	112
<b>M.5 - 25 MOAPA (RAÍZ)</b>	98	98	97	97,7

**Tabla 33***Cadmio en la raíz de la alfalfa después de la fitorremediación*

RAIZ (ALFALFA)	INFORME	INFORME	INFORME	Promedio
	DE ENSAYO	DE ENSAYO	DE ENSAYO	
	1 (mg/kg)	2 (mg/kg)	3 (mg/kg)	
M.1 - 20 MASTER 10 (RAÍZ)	3	3	4	3,3
M.2 - 25 MASTER 10 (RAÍZ)	4	4	3	3,7
M.3 - 30 MASTER 10 (RAÍZ)	2	2	3	2,3
M.4 - 25 CALIFORNIA (RAÍZ)	5	5	6	5,3
M.5 - 25 MOAPA (RAÍZ)	4	3	5	4,0

**Tabla 34***Plomo en la raíz de la alfalfa después de la fitorremediación*

RAIZ (ALFALFA)	INFORME	INFORME	INFORME	Promedio
	DE ENSAYO	DE ENSAYO	DE ENSAYO	
	1 (mg/kg)	2 (mg/kg)	3 (mg/kg)	
M.1 - 20 MASTER 10 (RAÍZ)	16	17	16	16,3
M.2 - 25 MASTER 10 (RAÍZ)	14	18	14	15,3
M.3 - 30 MASTER 10 (RAÍZ)	13	14	12	12,3
M.4 - 25 CALIFORNIA (RAÍZ)	19	20	19	19,3
M.5 - 25 MOAPA (RAÍZ)	16	17	15	16,0

Tabla 35

*Cromo en los tallos y hojas de la alfalfa después de la fitorremediación*

<b>TALLOS Y HOJAS (ALFALFA)</b>	<b>INFORME DE ENSAYO 1 (mg/kg)</b>	<b>INFORME DE ENSAYO 2 (mg/kg)</b>	<b>INFORME DE ENSAYO 3 (mg/kg)</b>	<b>Promedio</b>
<b>M.1 - 20 MASTER 10 (HOJAS Y TALLO)</b>	<1	<1	<1	<1
<b>M.2 - 25 MASTER 10 (HOJAS Y TALLO)</b>	<1	<1	<1	<1
<b>M.3 - 30 MASTER 10 (HOJAS Y TALLO)</b>	<1	<1	<1	<1
<b>M.4 - 25 CALIFORNIA (HOJAS Y TALLO)</b>	<1	<1	<1	<1
<b>M.5 - 25 MOAPA (HOJAS Y TALLO)</b>	<1	<1	<1	<1

Tabla 36

*Cadmio en los tallos y hojas de la alfalfa después de la fitorremediación*

<b>TALLOS Y HOJAS (ALFALFA)</b>	<b>INFORME DE ENSAYO 1 (mg/kg)</b>	<b>INFORME DE ENSAYO 2 (mg/kg)</b>	<b>INFORME DE ENSAYO 3 (mg/kg)</b>	<b>Promedio</b>
<b>M.1 - 20 MASTER 10 (HOJAS Y TALLO)</b>	<1	<1	<1	<1
<b>M.2 - 25 MASTER 10 (HOJAS Y TALLO)</b>	<1	<1	<1	<1
<b>M.3 - 30 MASTER 10 (HOJAS Y TALLO)</b>	<1	<1	<1	<1
<b>M.4 - 25 CALIFORNIA (HOJAS Y TALLO)</b>	<1	<1	<1	<1
<b>M.5 - 25 MOAPA (HOJAS Y TALLO)</b>	<1	<1	<1	<1

**Tabla 37***Plomo en los tallos y hojas de la alfalfa después de la fitorremediación*

<b>TALLOS Y HOJAS (ALFALFA)</b>	<b>INFORME DE ENSAYO 1 (mg/kg)</b>	<b>INFORME DE ENSAYO 2 (mg/kg)</b>	<b>INFORME DE ENSAYO 3 (mg/kg)</b>	<b>Promedio</b>
<b>M.1 - 20 MASTER 10 (HOJAS Y TALLO)</b>	3	2	3	2,7
<b>M.2 - 25 MASTER 10 (HOJAS Y TALLO)</b>	2	2	2	2,0
<b>M.3 - 30 MASTER 10 (HOJAS Y TALLO)</b>	3	4	3	3,3
<b>M.4 - 25 CALIFORNIA (HOJAS Y TALLO)</b>	<2	2	<2	<2
<b>M.5 - 25 MOAPA (HOJAS Y TALLO)</b>	3	3	3	3,0

## Anexo 4

### Análisis de metales pesados por ICP-OES

Quality Analysis...



## INFORME DE ENSAYO

P23-417

A SOLICITUD DE:	HERLIS SERGIO HUALLPA VARGAS
POR CUENTA DE:	HERLIS SERGIO HUALLPA VARGAS
ASUNTO:	Análisis Químico
CONTACTO:	Sr. Huallpa
TIPO DE MUESTRA(S):	Pulpas
CANTIDAD DE MUESTRA(S):	19
CARACTERÍSTICAS DE LAS MUESTRAS:	Secas
CONDICIONES DE RECEPCION:	En bolsas de plástico
FECHA DE RECEPCIÓN:	Miércoles, 17 de Mayo de 2023
FECHA DE EJECUCION DE ENSAYO:	17-05-23 al 02-06-23
FECHA DE REPORTE:	Viernes, 02 de Junio de 2023
INSTRUCCIONES DE ENSAYO:	Code P Mtra. peso de muestra Code VH-ME-ICP4 Análisis por ICP-OES Digestion total

TOTAL DE PAGINAS: 08 (Incluida esta)

Innovative Technologies

Los resultados corresponden al ensayo solicitado en la (s) muestra (s) recibida (s)

Los ensayos se realizaron en :  
ACTLABS SKYLINE PERU SAC.  
Calle Martín de Murúa N° 170-174  
Urb. Maranga- San Miguel, Lima - Peru

Ing. Verónica Caso  
Jefe de Laboratorio  
ACTLABS SKYLINE PERU SAC

Certificado por:



SE PROHÍBE LA REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL SIN LA AUTORIZACIÓN DE ACTLABS SKYLINE PERÚ S.A.C.  
"Este servicio ha sido realizado de acuerdo a los controles establecidos por un sistema de gestión de la calidad que cumple con los requisitos de la norma ISO 9001:2015, con número de certificado AENOR ER-0174/2019 e IQNet ES-0174/2019"

Calle Martín de Murúa N° 170 - 174, Urb. Maranga - San Miguel, Lima - Perú  
Central Telefónica: (511) 464 9762 - Móvil: 994 698 219 / 993 301 872 - Correo: comercial@actlabsperu.com - www.actlabsperu.com



## RESULTADOS

Símbo- lo de Aná- lisis	Código de Aná- lisis	Símbo- lo de Unidad	Límite De- tección	Ag	Al	As	Ba	Be	Bi	Ca	Cd
				VH-ME-ICP4 ppm	VH-ME-ICP4 %	VH-ME-ICP4 ppm	VH-ME-ICP4 ppm	VH-ME-ICP4 ppm	VH-ME-ICP4 ppm	VH-ME-ICP4 %	VH-ME-ICP4 ppm
1	MACETA 1 - 20 MASTER 10 - M1 (BOLSA)			0.5	4.08	29	680	1.5	7	7.25	4
2	MACETA 2 - 25 MASTER 10 - M2 (BOLSA)			0.8	3.95	31	710	1.5	11	7.34	2
3	MACETA 3 - 30 MASTER 10 - M3 (BOLSA)			0.7	4.09	28	733	1.4	11	7.15	3
4	MACETA 4 - 25 CALIFORNIA - M4 (BOLSA)			0.8	3.09	26	555	1.0	10	7.48	1
5	MACETA 5 - 25 MOAPA - M5 (BOLSA)			0.7	3.85	30	772	1.5	8	7.13	2
6	BIOSÓLIDO + TIERRA (BOLSA)			1.3	4.62	41	884	1.4	12	8.21	7
7	BIOSÓLIDO (BOLSA)			2.4	4.71	52	837	1.6	20	6.09	7
8	M.1 - 20 MASTER 10 (RAÍZ)			0.7	0.27	11	187	< 0.5	5	0.85	3
9	M.2 - 25 MASTER 10 (RAÍZ)			0.3	0.26	9	135	< 0.5	< 5	0.84	4
10	M.3 - 30 MASTER 10 (RAÍZ)			0.4	0.23	12	114	< 0.5	< 5	1.01	2
11	M.4 - 25 CALIFORNIA (RAÍZ)			0.6	1.08	16	295	< 0.5	< 5	0.54	5
12	M.5 - 25 MOAPA (RAÍZ)			0.4	0.47	10	76	< 0.5	< 5	1.02	4
13	BLANCO (RAÍZ)			< 0.2	2.69	< 3	40	0.9	< 5	1.39	< 1
14	M.1 - 20 MASTER 10 (HOJAS Y TALLO)			< 0.2	0.27	< 3	38	< 0.5	< 5	0.15	< 1
15	M.2 - 25 MASTER 10 (HOJAS Y TALLO)			0.1	0.27	< 3	39	< 0.5	< 5	0.41	< 1
16	M.3 - 30 MASTER 10 (HOJAS Y TALLO)			< 0.2	0.21	< 3	37	< 0.5	< 5	1.01	< 1
17	M.4 - 25 CALIFORNIA (HOJAS Y TALLO)			0.2	0.25	< 3	34	< 0.5	< 5	0.24	< 1
18	M.5 - 25 MOAPA (HOJAS Y TALLO)			0.2	0.22	< 3	36	< 0.5	< 5	0.45	< 1
19	BLANCO (HOJAS Y TALLO)			< 0.2	0.27	< 3	35	< 0.5	< 5	1.26	< 1

Certificado por:



SE PROHÍBE LA REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL SIN LA AUTORIZACIÓN DE ACTLABS SKYLINE PERÚ S.A.C.  
 \*Este servicio ha sido realizado de acuerdo a los controles establecidos por un sistema de gestión de la calidad que cumple con los requisitos de la norma ISO 9001:2015, con número de certificado AENOR ER-0174/2019 e IQNet ES-0174/2019\*

Calle Martín de Murúa N° 170 - 174, Urb. Maranga - San Miguel, Lima - Perú  
 Central Telefónica: (S11) 4649762 - Móvil: 994 698 219 / 993 301 872 - Correo: comercial@actlabsperu.com - www.actlabsperu.com



## RESULTADOS

Número	Símbolo de Analito Código de Análisis Símbolo de Unidad Límite Detección	Co	Cr	Cu	Fe	Ga	K	La	Mg
		VH-ME-ICP4 ppm	VH-ME-ICP4 ppm	VH-ME-ICP4 ppm	VH-ME-ICP4 %	VH-ME-ICP4 ppm	VH-ME-ICP4 %	VH-ME-ICP4 ppm	VH-ME-ICP4 %
		1	1	0.5	0.01	10	0.01	0.5	0.01
1	MACETA 1 - 20 MASTER 10 - M1 (BOLSA)	17	200	79.3	2.79	< 10	1.23	19.2	0.60
2	MACETA 2 - 25 MASTER 10 - M2 (BOLSA)	14	172	92.4	3.26	< 10	1.26	24.1	0.62
3	MACETA 3 - 30 MASTER 10 - M3 (BOLSA)	19	179	68.5	2.90	< 10	1.27	21.3	0.59
4	MACETA 4 - 25 CALIFORNIA - M4 (BOLSA)	16	146	70.8	2.63	< 10	1.22	18.4	0.65
5	MACETA 5 - 25 MOAPA - M5 (BOLSA)	20	161	82.8	3.18	< 10	1.25	22.3	0.60
6	BIOSÓLIDO + TIERRA (BOLSA)	21	258	106.0	3.28	< 10	1.31	26.5	0.85
7	BIOSÓLIDO (BOLSA)	23	321	112.6	2.64	13	1.07	26.4	0.67
8	M.1 - 20 MASTER 10 (RAÍZ)	4	59	15.5	0.32	< 10	0.02	6.5	0.19
9	M.2 - 25 MASTER 10 (RAÍZ)	6	87	10.1	0.05	< 10	0.02	1.3	0.18
10	M.3 - 30 MASTER 10 (RAÍZ)	3	79	20.6	0.30	< 10	0.01	4.1	0.21
11	M.4 - 25 CALIFORNIA (RAÍZ)	5	112	27.8	0.52	< 10	0.01	6.8	0.17
12	M.5 - 25 MOAPA (RAÍZ)	4	98	15.4	0.22	< 10	0.02	2.9	0.19
13	BLANCO (RAÍZ)	8	< 1	17.9	1.59	< 10	1.08	13.6	0.28
14	M.1 - 20 MASTER 10 (HOJAS Y TALLO)	< 1	< 1	10.3	0.10	< 10	0.07	1.6	0.08
15	M.2 - 25 MASTER 10 (HOJAS Y TALLO)	< 1	< 1	4.8	0.12	< 10	0.04	1.2	0.05
16	M.3 - 30 MASTER 10 (HOJAS Y TALLO)	< 1	< 1	10.4	0.12	< 10	0.03	1.4	0.06
17	M.4 - 25 CALIFORNIA (HOJAS Y TALLO)	< 1	< 1	8.1	0.15	< 10	0.08	1.7	0.04
18	M.5 - 25 MOAPA (HOJAS Y TALLO)	< 1	< 1	9.5	0.10	< 10	0.05	1.5	0.07
19	BLANCO (HOJAS Y TALLO)	< 1	< 1	12.0	0.15	< 10	2.01	1.5	0.22

Certificado por:



SE PROHÍBE LA REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL SIN LA AUTORIZACIÓN DE ACTLABS SKYLINE PERÚ S. AC.  
 "Este servicio ha sido realizado de acuerdo a los controles establecidos por un sistema de gestión de la calidad que cumple con los requisitos de la norma ISO 9001:2015, con número de certificado AENOR ER-0174/2019 e IQNet ES-0174/2019"

Calle Martín de Murúa 11° 170 - 174, Urb. Maranga - San Miguel, Lima - Perú  
 Central Telefónica: (51 1) 4649762 - Móvil: 994 698 219 / 993 301 872 - Correo: comercial@actlabsperu.com - www.actlabsperu.com

Quality Analysis...



Innovative Technologies

P23-417

Page 4 of 8

## RESULTADOS

Número	Símbolo de Análisis Código de Análisis Símbolo de Unidad Límite Detección	Mn	Mo	Na	Nb	Ni	P	Pb	S
		VH-ME-ICP4 ppm	VH-ME-ICP4 ppm	VH-ME-ICP4 %	VH-ME-ICP4 ppm	VH-ME-ICP4 ppm	VH-ME-ICP4 %	VH-ME-ICP4 ppm	VH-ME-ICP4 %
		2	1	0.01	1	1	0.01	2	0.01
1	MACETA 1 - 20 MASTER 10 - M1 (BOLSA)	978	25	1.08	9	31	0.39	8	0.33
2	MACETA 2 - 25 MASTER 10 - M2 (BOLSA)	1098	19	1.15	11	22	0.44	9	0.34
3	MACETA 3 - 30 MASTER 10 - M3 (BOLSA)	1047	21	1.10	9	30	0.37	11	0.29
4	MACETA 4 - 25 CALIFORNIA - M4 (BOLSA)	978	19	0.90	11	27	0.41	6	0.30
5	MACETA 5 - 25 MOAPA - M5 (BOLSA)	1068	28	1.18	9	28	0.44	7	0.32
6	BIOSÓLIDO + TIERRA (BOLSA)	1164	29	1.42	11	35	0.58	27	0.46
7	BIOSÓLIDO (BOLSA)	970	17	1.20	12	39	1.22	38	0.81
8	M.1 - 20 MASTER 10 (RAÍZ)	168	3	0.38	3	4	0.13	18	0.13
9	M.2 - 25 MASTER 10 (RAÍZ)	45	8	0.11	< 1	12	0.10	14	0.11
10	M.3 - 30 MASTER 10 (RAÍZ)	82	7	0.30	3	5	0.15	13	0.12
11	M.4 - 25 CALIFORNIA (RAÍZ)	164	9	0.45	1	9	0.11	19	0.12
12	M.5 - 25 MOAPA (RAÍZ)	65	2	0.18	2	8	0.10	18	0.11
13	BLANCO (RAÍZ)	25	2	0.25	5	2	0.17	< 2	0.12
14	M.1 - 20 MASTER 10 (HOJAS Y TALLO)	21	< 1	0.09	< 1	< 1	0.06	3	0.08
15	M.2 - 25 MASTER 10 (HOJAS Y TALLO)	23	< 1	0.20	< 1	1	0.03	2	0.03
16	M.3 - 30 MASTER 10 (HOJAS Y TALLO)	35	< 1	0.09	< 1	< 1	0.05	3	0.04
17	M.4 - 25 CALIFORNIA (HOJAS Y TALLO)	25	< 1	0.10	< 1	< 1	0.05	< 2	0.03
18	M.5 - 25 MOAPA (HOJAS Y TALLO)	33	< 1	0.09	1	< 1	0.03	3	0.04
19	BLANCO (HOJAS Y TALLO)	22	< 1	0.05	< 1	< 1	0.22	< 2	0.08

Certificados por:



SE PROHÍBE LA REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL SIN LA AUTORIZACIÓN DE ACTLABS SKYLINE PERÚ S.A.C.  
 \*Este servicio ha sido realizado de acuerdo a los controles establecidos por un sistema de gestión de la calidad que cumple con los requisitos de la norma ISO 9001:2015, con número de certificado AENOR ER-0174/2019 e IQNet ES-0174/2019\*

Calle Martín de Murúa N° 170 - 174, Urb. Maranga - San Miguel, Lima - Perú  
 Central Telefónica: (511) 464 9762 - Móvil: 994 698 219 / 993 301 872 - Correo: comercial@actlabsperu.com - www.actlabsperu.com



## RESULTADOS

Símbo de Analito	Código de Análisis	Sb	Sc	Se	Sn	Sr	Te	Ti	Ti
		VH-ME-ICP4							
Símbo de Unidad	Límite Detección	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	%	ppm
		5	0.5	10	10	0.5	10	0.01	2
1	MACETA 1 - 20 MASTER 10 - M1 (BOLSA)	< 5	6	< 10	10	247.7	< 10	0.34	< 2
2	MACETA 2 - 25 MASTER 10 - M2 (BOLSA)	5	6.2	< 10	< 10	343.6	< 10	0.35	< 2
3	MACETA 3 - 30 MASTER 10 - M3 (BOLSA)	< 5	6.2	< 10	11	296.3	< 10	0.34	< 2
4	MACETA 4 - 25 CALIFORNIA - M4 (BOLSA)	< 5	6	< 10	< 10	233.4	< 10	0.38	< 2
5	MACETA 5 - 25 MOAPA - M5 (BOLSA)	6	6.1	< 10	< 10	298.9	< 10	0.35	< 2
6	BIOSÓLIDO + TIERRA (BOLSA)	5	6.2	< 10	11	464.4	< 10	0.36	< 2
7	BIOSÓLIDO (BOLSA)	6	6.3	< 10	11	444.0	< 10	0.36	< 2
8	M.1 - 20 MASTER 10 (RAÍZ)	< 5	0.3	< 10	< 10	126.2	< 10	0.04	< 2
9	M.2 - 25 MASTER 10 (RAÍZ)	< 5	< 0.5	< 10	< 10	37.8	< 10	0.01	< 2
10	M.3 - 30 MASTER 10 (RAÍZ)	< 5	< 0.5	< 10	< 10	85.6	< 10	0.03	< 2
11	M.4 - 25 CALIFORNIA (RAÍZ)	< 5	< 0.5	< 10	< 10	149.2	< 10	0.02	< 2
12	M.5 - 25 MOAPA (RAÍZ)	< 5	< 0.5	< 10	< 10	65.7	< 10	0.02	< 2
13	BLANCO (RAÍZ)	< 5	1.5	< 10	< 10	75.2	< 10	0.22	< 2
14	M.1 - 20 MASTER 10 (HOJAS Y TALLO)	< 5	< 0.5	< 10	< 10	91.3	< 10	0.01	< 2
15	M.2 - 25 MASTER 10 (HOJAS Y TALLO)	< 5	< 0.5	< 10	< 10	84.8	< 10	0.01	< 2
16	M.3 - 30 MASTER 10 (HOJAS Y TALLO)	< 5	< 0.5	< 10	< 10	80.3	< 10	0.01	< 2
17	M.4 - 25 CALIFORNIA (HOJAS Y TALLO)	< 5	< 0.5	< 10	< 10	84.1	< 10	< 0.01	< 2
18	M.5 - 25 MOAPA (HOJAS Y TALLO)	< 5	< 0.5	< 10	< 10	100.8	< 10	< 0.01	< 2
19	BLANCO (HOJAS Y TALLO)	< 5	< 0.5	< 10	< 10	78.9	< 10	0.02	< 2

Certificados por:



SE PROHÍBE LA REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL SIN LA AUTORIZACIÓN DE ACTLABS SKYLINE PERÚ S.A.C.

\*Este servicio ha sido realizado de acuerdo a los controles establecidos por un sistema de gestión de la calidad que cumple con los requisitos de la norma ISO 9001:2015, con número de certificado AENOR ER-0174/2019 e IQNet ES-0174/2019\*



## RESULTADOS

Código de Análisis	Símbolo de Análisis	V	W	Y	Zn	Zr
		VH-ME-ICP4 Ppm	VH-ME-ICP4 ppm	VH-ME-ICP4 ppm	VH-ME-ICP4 ppm	VH-ME-ICP4 ppm
Límite Detección		2	10	0.5	0.5	0.5
1	MACETA 1 - 20 MASTER 10 - M1 (BOLSA)	63	< 10	11.0	265.5	95.5
2	MACETA 2 - 25 MASTER 10 - M2 (BOLSA)	72	< 10	13.0	320.8	120.2
3	MACETA 3 - 30 MASTER 10 - M3 (BOLSA)	64	< 10	12.4	241.1	120.1
4	MACETA 4 - 25 CALIFORNIA - M4 (BOLSA)	74	< 10	10.3	291.2	117.4
5	MACETA 5 - 25 MOAPA - M5 (BOLSA)	75	< 10	12.1	328.7	121.6
6	BIOSÓLIDO + TIERRA (BOLSA)	78	< 10	12.7	557.3	126.2
7	BIOSÓLIDO (BOLSA)	79	< 10	12.1	653.2	149.9
8	M.1 - 20 MASTER 10 (RAÍZ)	14	< 10	2.4	205.4	19.2
9	M.2 - 25 MASTER 10 (RAÍZ)	5	< 10	< 0.5	58.6	4.8
10	M.3 - 30 MASTER 10 (RAÍZ)	13	< 10	0.8	208.7	5.2
11	M.4 - 25 CALIFORNIA (RAÍZ)	4	< 10	2.3	193.0	7.3
12	M.5 - 25 MOAPA (RAÍZ)	2	< 10	0.5	123.1	3.8
13	BLANCO (RAÍZ)	8	< 10	5.4	31.2	13.5
14	M.1 - 20 MASTER 10 (HOJAS Y TALLO)	< 2	< 10	< 0.5	87.6	11.4
15	M.2 - 25 MASTER 10 (HOJAS Y TALLO)	< 2	< 10	< 0.5	180.2	1.1
16	M.3 - 30 MASTER 10 (HOJAS Y TALLO)	< 2	< 10	< 0.5	109.5	1.1
17	M.4 - 25 CALIFORNIA (HOJAS Y TALLO)	< 2	< 10	< 0.5	74.3	1.5
18	M.5 - 25 MOAPA (HOJAS Y TALLO)	< 2	< 10	< 0.5	107.3	0.9
19	BLANCO (HOJAS Y TALLO)	< 2	< 10	< 0.5	34.6	1.8

Certificado por:



SE PROHÍBE LA REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL SIN LA AUTORIZACIÓN DE ACTLABS SKYLINE PERÚ S.A.C.  
 "Este servicio ha sido realizado de acuerdo a los controles establecidos por un sistema de gestión de la calidad que cumple con los requisitos de la norma ISO 9001:2015, con número de certificado AENOR ER-0174/2019 e IQNet ES-0174/2019"

Calle Martín de Murúa N° 170 - 174, Urb. Maranga - San Miguel, Lima - Perú  
 Central Telefónica: (51 1) 464 9762 - Móvil: 994 698 219 / 993 301 872 - Correo: comercial@actlabsperu.com - www.actlabsperu.com

## Anexo 5

### Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Suelo

**Figura 37**

#### Estándar de calidad ambiental para suelo

INORGÁNICOS				
Arsénico	50	50	140	EPA 3050 EPA 3051
Bario total <sup>(15)</sup>	750	500	2 000	EPA 3050 EPA 3051
Cadmio	1,4	10	22	EPA 3050 EPA 3051
Cromo total	**	400	1 000	EPA 3050 EPA 3051
Cromo VI	0,4	0,4	1,4	EPA 3060/ EPA 7199 ó DIN EN 15192 <sup>(16)</sup>
Mercurio	6,6	6,6	24	EPA 7471 EPA 6020 ó 200.8
Plomo	70	140	800	EPA 3050 EPA 3051
Cianuro Libre	0,9	0,9	8	EPA 9013 SEMWW-AWWA-WEF 4500 CN F o ASTM D7237 y/o ISO 17690:2015

Parámetros en mg/kg PS <sup>(2)</sup>	Usos del Suelo <sup>(1)</sup>			Métodos de ensayo <sup>(7) y (8)</sup>
	Suelo Agrícola <sup>(3)</sup>	Suelo Residencial/ Parques <sup>(4)</sup>	Suelo Comercial <sup>(5)/ Industrial/ Extractivo<sup>(6)</sup></sup>	
<b>ORGÁNICOS</b>				
<b>Hidrocarburos aromáticos volátiles</b>				
Benceno	0,03	0,03	0,03	EPA 8260 <sup>(9)</sup> EPA 8021
Tolueno	0,37	0,37	0,37	EPA 8260 EPA 8021
Etilbenceno	0,082	0,082	0,082	EPA 8260 EPA 8021
Xilenos <sup>(10)</sup>	11	11	11	EPA 8260 EPA 8021
<b>Hidrocarburos poliaromáticos</b>				
Naftaleno	0,1	0,6	22	EPA 8260 EPA 8021 EPA 8270
Benzo(a) pireno	0,1	0,7	0,7	EPA 8270
<b>Hidrocarburos de Petróleo</b>				
Fracción de hidrocarburos F1 <sup>(11)</sup> (C6-C10)	200	200	500	EPA 8015
Fracción de hidrocarburos F2 <sup>(12)</sup> (>C10-C28)	1200	1200	5000	EPA 8015
Fracción de hidrocarburos F3 <sup>(13)</sup> (>C28-C40)	3000	3000	6000	EPA 8015
<b>Compuestos Organoclorados</b>				
Bifenilos policlorados - PCB <sup>(14)</sup>	0,5	1,3	33	EPA 8082 EPA 8270
Tetracloroetileno	0,1	0,2	0,5	EPA 8260
Tricloroetileno	0,01	0,01	0,01	EPA 8260

Nota: (MINAM, 2017).

**UNSCH**ESCUELA DE  
POSGRADO**CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD 149-2023-UNSCH-EPG/EGAP**

El que suscribe; responsable verificador de originalidad de trabajo de tesis de Posgrado en segunda instancia para la **Escuela de Posgrado - UNSCH**; en cumplimiento a la Resolución Directoral N° 198-2021-UNSCH-EPG/D, Reglamento de Originalidad de trabajos de Investigación de la UNSCH, otorga lo siguiente:

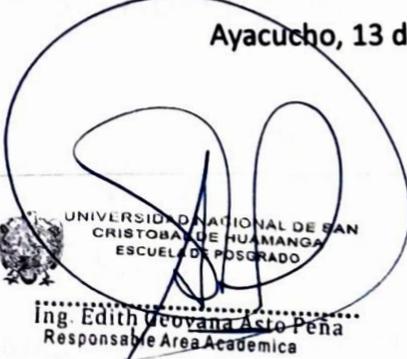
**CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD**

<b>AUTOR</b>	Bach. Hualpa Vargas, Herlis Sergio
<b>DENOMINACIÓN DEL PROGRAMA DE ESTUDIOS</b>	MAESTRÍA EN INGENIERÍA AMBIENTAL
<b>GRADO ACADÉMICO QUE OTORGA</b>	MAESTRO
<b>DENOMINACIÓN DEL GRADO ACADÉMICO</b>	MAESTRO(A) EN INGENIERÍA AMBIENTAL
<b>TÍTULO DE TESIS</b>	Remoción de metales pesados de los biosólidos de la planta de tratamiento de aguas residuales "La Tatora" Ayacucho, utilizando la alfalfa (medicago sativa)
<b>EVALUACIÓN DE ORIGINALIDAD</b>	12% de similitud
<b>Nº DE TRABAJO</b>	2165356995
<b>FECHA</b>	13-sept.-2023

Por tanto, según los artículos 12, 13 y 17 del Reglamento de Originalidad de Trabajos de Investigación, es procedente otorgar la constancia de originalidad con depósito.

Se expide la presente constancia, a solicitud del interesado para los fines que crea conveniente.

Ayacucho, 13 de setiembre del 2023.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN  
CRISTÓBAL DE HUAMANGA  
ESCUELA DE POSGRADO

Ing. Edith Geovana Asto Peña  
Responsable Área Académica

Remoción de metales pesados  
de los biosólidos de la planta  
de tratamiento de aguas  
residuales “La Totora”  
Ayacucho, utilizando la alfalfa  
(medicago sativa)

*por Herlis Sergio Huallpa Vargas*

---

**Fecha de entrega:** 13-sep-2023 04:14p.m. (UTC-0500)

**Identificador de la entrega:** 2165356995

**Nombre del archivo:** TESIS\_HERLIS\_SERGIO\_HUALLPA\_VARGAS.docx (41.12M)

**Total de palabras:** 21662

**Total de caracteres:** 110313

# Remoción de metales pesados de los biosólidos de la planta de tratamiento de aguas residuales "La Totora" Ayacucho, utilizando la alfalfa (medicago sativa)

## INFORME DE ORIGINALIDAD

12%

INDICE DE SIMILITUD

12%

FUENTES DE INTERNET

4%

PUBLICACIONES

6%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

## FUENTES PRIMARIAS

1

[hdl.handle.net](http://hdl.handle.net)

Fuente de Internet

2%

2

[repositorio.uncp.edu.pe](http://repositorio.uncp.edu.pe)

Fuente de Internet

1%

3

[repositorio.unfv.edu.pe](http://repositorio.unfv.edu.pe)

Fuente de Internet

1%

4

[repositorio.ucss.edu.pe](http://repositorio.ucss.edu.pe)

Fuente de Internet

1%

5

Submitted to Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga

Trabajo del estudiante

1%

6

[repositorio.unsch.edu.pe](http://repositorio.unsch.edu.pe)

Fuente de Internet

1%

7

Submitted to Universidad Cesar Vallejo

Trabajo del estudiante

1%

8

[repositorio.unh.edu.pe](http://repositorio.unh.edu.pe)

Fuente de Internet

1%

9	repositorio.untels.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
10	www.zaragoza.unam.mx Fuente de Internet	<1 %
11	repositorio.uandina.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
12	1library.co Fuente de Internet	<1 %
13	ri.ues.edu.sv Fuente de Internet	<1 %
14	tesis.usat.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
15	repositorio.upeu.edu.pe:8080 Fuente de Internet	<1 %
16	repositorio.upct.es Fuente de Internet	<1 %
17	repositorio.unal.edu.co Fuente de Internet	<1 %
18	dspace.unitru.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
19	Submitted to Universidad Nacional del Centro del Peru Trabajo del estudiante	<1 %
20	aguayambiente.com Fuente de Internet	

<1 %

---

**21** repositorio.utc.edu.ec  
Fuente de Internet

<1 %

---

**22** dspace.esPOCH.edu.ec  
Fuente de Internet

<1 %

---

**23** Submitted to Universidad Andina del Cusco  
Trabajo del estudiante

<1 %

---

Excluir citas      Activo

Excluir bibliografía      Activo

Excluir coincidencias      < 30 words



# Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga

## ESCUELA DE POSGRADO

### ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE MAESTRO (A) EN INGENIERIA AMBIENTAL RESOLUCIÓN DIRECTORAL N° 00633-2023-UNSCH-EPG/D

Siendo las 04:00 p.m. de 5 de Setiembre de 2023 se reunieron en el auditorium de la Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, el Jurado Examinador y Calificador de tesis, presidido por el **Dr. Emilio Germán RAMÍREZ ROCA** director (e) de la Escuela de Posgrado, el **Dr. Agustín Julián PORTUGUEZ MAURTUA** director de la Unidad de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Química y Metalúrgica, por los siguientes miembros: **Mtro. León Fernando PEREZ CHAUCA** y el **Mtro. Abrahán Fernando TREJO ESPINOZA**; para la sustentación oral y pública de la tesis titulado, **REMOCION DE METALES PESADOS DE LOS BIOSOLIDOS DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES "LA TOTORA" AYACUCHO, UTILIZANDO LA ALFALFA ( medicago sativa)**. En la Ciudad de Ayacucho del 2023, presentada por el **Bach. Herlis Sergio HUALLPA VARGAS**. Teniendo como asesor al **Dr. Edgar Gregorio ARONES MEDINA**.

Acto seguido se procedió a la exposición de la tesis, con el fin de optar al Grado Académico de **MAESTRO (A) EN INGENIERIA AMBIENTAL**, Formulas las preguntas, éstas fueron absueltas por la graduanda. A continuación el Jurado Examinador y Calificador de tesis procedió a la votación, la que dio como resultado el siguiente calificativo:

DECIDIBLE (16)

#### CALIFICACION (\*)

Aprobado por unanimidad	✓
Aprobado por Mayoría	-
Desaprobada por Unanimidad	-
Desaprobada por mayoría	-

(\*) Marcar con aspa

Luego, el presidente del Jurado recomienda que la Escuela de Posgrado proponga que se le otorgue al **Bach. Herlis Sergio HUALLPA VARGAS** el Grado Académico de **MAESTRO (A) EN INGENIERIA AMBIENTAL**. Siendo la 6.0 p.m. hrs. Se levanta la sesión.

Se extiende el acta en la ciudad de Ayacucho, a las 6.0 p.m. hrs. Del 05 de setiembre 2023.

.....  
**Dr. Emilio Germán RAMÍREZ ROCA**  
Director (e) de la Escuela de Posgrado

.....  
**Dr. Agustín Julián PORTUGUEZ MAURTUA**  
Director de la Unidad de Posgrado – FIQM

.....  
**Mtro. León Fernando PEREZ CHAUCA**  
Miembro

.....  
**Mtro. Abrahán Fernando TREJO ESPINOZA**  
Miembro

.....  
**Mtro. JUAN MIGUEL ANICAMA ANICAMA**  
Secretario Docente (e)

**Observaciones:**

.....

.....