

UNIVERSIDAD DE HUÁNUCO
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA AMBIENTAL



TESIS

“Eficacia de la fitoextracción de metales pesados en suelos contaminados, utilizando las especies de Chocho silvestre (*Lupinus Tomentosus*) y Nabo silvestre (*Brassica Rapa*), en la provincia de Pasco”

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERA
AMBIENTAL**

AUTORA: Osorio Yacolca, Antonella Betsabe

ASESOR: Gamez Penadillo, Joel

HUÁNUCO – PERÚ

2025

U

D

H

**TIPO DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN:**

- Tesis (X)
- Trabajo de Suficiencia Profesional ()
- Trabajo de Investigación ()
- Trabajo Académico ()

LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN: Contaminación Ambiental**AÑO DE LA LÍNEA DE INVESTIGACIÓN** (2020)**CAMPO DE CONOCIMIENTO OCDE:****Área:** Ingeniería, Tecnología**Sub área:** Ingeniería ambiental**Disciplina:** Ingeniería ambiental y geológica**DATOS DEL PROGRAMA:**

Nombre del Grado/Título a recibir: Título Profesional de Ingeniero ambiental

Código del Programa: P09

Tipo de Financiamiento:

- Propio (X)
- UDH ()
- Fondos Concursables ()

DATOS DEL AUTOR:

Documento Nacional de Identidad (DNI): 71280976

DATOS DEL ASESOR:

Documento Nacional de Identidad (DNI): 23018222

Grado/Título: Maestro en ciencias económicas, mención: proyectos de inversión

Código ORCID: 0000-0003-4228-565X

DATOS DE LOS JURADOS:

N°	APELLIDOS Y NOMBRES	GRADO	DNI	Código ORCID
1	Valdivia Martel, Perfecta Sofía	Maestro en ingeniería, con mención en: gestión ambiental y desarrollo sostenible	43616954	0000-0002-7194-3714
2	Romero Estacio, Jorge Antonio	Maestro en gestión pública para el desarrollo social	22520481	0009-0000-2063-4076
3	Cajahuanca Torres, Raul	Maestro en gestión pública	22511841	0000-0002-5671-1907



UNIVERSIDAD DE HUÁNUCO

Facultad de Ingeniería

PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA AMBIENTAL

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO(A) AMBIENTAL

En la ciudad de Huánuco, siendo las 17:30 horas del día 26 del mes de mayo del año 2025, en cumplimiento de lo señalado en el Reglamento de Grados y Títulos de la Universidad de Huánuco, se reunieron el sustentante y el **Jurado Calificador** integrado por los docentes:

- Mg. Perfecta Sofia Valdivia Martel (Presidente)
- Mg. Jorge Antonio Romero Estacio (Secretario)
- Mg. Raul Cajahuanca Torres (Vocal)

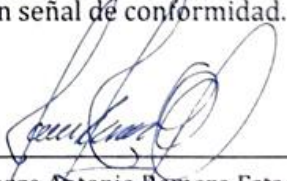
Nombrados mediante la **Resolución N° 0912-2025-D-FI-UDH**, para evaluar la Tesis intitulada: **"EFICACIA DE LA FITOEXTRACCIÓN DE METALES PESADOS EN SUELOS CONTAMINADOS, UTILIZANDO LAS ESPECIES DE CHOCHO SILVESTRE (*Lupinus tomentosus*) y NABO SILVESTRE (*Brassica rapa*), EN LA PROVINCIA DE PASCO"**, presentado por el (la) Bach. **OSORIO YACOLCA, ANTONELLA BETSABE**; para optar el Título Profesional de Ingeniero(a) Ambiental.

Dicho acto de sustentación se desarrolló en dos etapas: exposición y absolución de preguntas: procediéndose luego a la evaluación por parte de los miembros del Jurado.

Habiendo absuelto las objeciones que le fueron formuladas por los miembros del Jurado y de conformidad con las respectivas disposiciones reglamentarias, procedieron a deliberar y calificar, declarándolo(a) ~~aprobado(a)~~ *Por Unanimidad* con el calificativo cuantitativo de ~~14~~ *14* y cualitativo de ~~Suficiente~~ *Suficiente*. (Art. 47)

Siendo las ~~18:35~~ *18:35* horas del día ~~26~~ *26* del mes de ~~Mayo~~ *Mayo* del año ~~2025~~ *2025*, los miembros del Jurado Calificador firman la presente Acta en señal de conformidad.


Mg. Perfecta Sofia Valdivia Martel
DNI: 43616954
ORCID: 0000-0002-7194-3714
Presidente


Mg. Jorge Antonio Romero Estacio
DNI: 22520481
ORCID: 0009-0000-2063-4076
Secretario


Mg. Raul Cajahuanca Torres
DNI: 22511841
ORCID: 0000-0002-5671-1907
Vocal



UNIVERSIDAD DE HUÁNUCO

CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD

El comité de integridad científica, realizó la revisión del trabajo de investigación del estudiante: ANTONELLA BETSABE OSORIO YACOLCA, de la investigación titulada "EFICACIA DE LA FITOEXTRACCIÓN DE METALES PESADOS EN SUELOS CONTAMINADOS, UTILIZANDO LAS ESPECIES DE CHOCHO SILVESTRE (*Lupinus tomentosus*) y NABO SILVESTRE (*Brassica rapa*), EN LA PROVINCIA DE PASCO", con asesor(a) JOEL GAMEZ PENADILLO, designado(a) mediante documento: RESOLUCIÓN N° 2068-2023-D-FI-UDH del P. A. de INGENIERÍA AMBIENTAL.

Puede constar que la misma tiene un índice de similitud del 18 % verificable en el reporte final del análisis de originalidad mediante el Software Turnitin.

Por lo que concluyo que cada una de las coincidencias detectadas no constituyen plagio y cumple con todas las normas de la Universidad de Huánuco.

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

Huánuco, 21 de febrero de 2025



RICHARD J. SOLIS TOLEDO
D.N.I.: 47074047
cod. ORCID: 0000-0002-7629-6421



FERNANDO F. SILVERIO BRAVO
D.N.I.: 40618286
cod. ORCID: 0009-0008-6777-3370

87. Osorio Yacolca, Antonella Betsabe.docx

INFORME DE ORIGINALIDAD

18%

INDICE DE SIMILITUD

18%

FUENTES DE INTERNET

2%

PUBLICACIONES

7%

TRABAJOS DEL
ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1

repositorio.lamolina.edu.pe

Fuente de Internet

2%

2

repositorio.unasam.edu.pe

Fuente de Internet

2%

3

repositorio.udh.edu.pe

Fuente de Internet

2%

4

hdl.handle.net

Fuente de Internet

1%

5

repositorio.unas.edu.pe

Fuente de Internet

1%



RICHARD J. SOLIS TOLEDO
D.N.I.: 47074047
cod. ORCID: 0000-0002-7629-6421



FERNANDO F. SILVERIO BRAVO
D.N.I.: 40618286
cod. ORCID: 0009-0008-6777-3370

DEDICATORIA

A DIOS; por ser mi guía y fortaleza durante la carrera y a mi madre. Esta tesis es el resultado de tu amor. Tus palabras de aliento, tu perseverancia y tu ejemplo constante han sido mi inspiración. Cada día que trabajaste incansablemente y cada vez que me brindaste tu cariño son tesoros que valoro profundamente. Esta tesis es un tributo a ti.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a DIOS, por darme el don de la perseverancia, para alcanzar esta meta.

A mi madre, por ser apoyo y soporte en todo momento; A mis abuelos y tíos, quienes fueron apoyo.

A la Universidad de Huánuco, que me abrió sus puertas, para ser mejor persona y buen profesional. A los docentes, por compartir sus conocimientos.

A mi asesor y jurados, por ser guías durante la ejecución de la presente tesis.

ÍNDICE

DEDICATORIA.....	II
AGRADECIMIENTO.....	III
ÍNDICE.....	IV
ÍNDICE DE TABLAS.....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
RESUMEN.....	X
ABSTRACT	XI
INTRODUCCIÓN.....	XII
CAPÍTULO I.....	13
PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	13
1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	13
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	15
1.2.1. PROBLEMA GENERAL	15
1.2.2. PROBLEMAS ESPECÍFICOS.....	16
1.3. OBJETIVOS	16
1.3.1. OBJETIVO GENERAL	16
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
1.4. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	17
1.5. VIABILIDAD DE LA INVESTIGACIÓN	17
1.5.1. VIABILIDAD OPERATIVA	17
1.5.2. VIABILIDAD ECONÓMICA	18
1.5.3. VIABILIDAD AMBIENTAL	18
1.5.4. VIABILIDAD SOCIAL	18
CAPÍTULO II.....	19
MARCO TEÓRICO.....	19
2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN	19
2.1.1. ESTUDIOS NACIONALES.....	19
2.1.2. ESTUDIOS REGIONALES.....	21
2.2. BASES TEÓRICAS	23
2.2.1. FITORREMEDIACIÓN	23
2.2.2. ESPECIES UTILIZADAS PARA FITOACUMULACIÓN.....	28

2.2.3. BIODISPONIBILIDAD DE METALES PESADOS.....	29
2.2.4. PLANTAS DESARROLLADAS EN AMBIENTES	30
2.2.4.1. CONTAMINADOS POR METALES PESADOS.....	30
2.2.5. TOLERANCIA DE PLANTAS HACIA LOS METALES PESADOS.....	31
2.2.6. LA BASE GENÉTICA A LA TOLERANCIA.....	31
2.2.7. ESPECIFICIDAD DE LA TOLERANCIA A LOS METALES	32
2.2.8. TOLERANCIA MÚLTIPLE.....	32
2.2.9. ESPECIES VEGETATIVAS	33
2.2.10. EL SUELO	35
2.2.11. METALES PESADOS	39
2.2.11.5. CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA DEL SUELO (CE)	46
2.3. DEFINICIONES CONCEPTUALES	47
2.4. HIPÓTESIS	47
2.4.1. HIPÓTESIS GENERAL	47
2.4.2. HIPÓTESIS SECUNDARIOS.....	48
2.5. VARIABLE ORDINAL.....	48
2.5.1. VARIABLE EVALUATIVA.....	48
2.5.2. VARIABLE DE CALIBRACIÓN	48
2.6. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES	49
CAPÍTULO III.....	50
METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....	50
3.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN.....	50
3.1.1. ENFOQUE.....	50
3.1.2. ALCANCE O NIVEL	50
3.1.3. DISEÑO	51
3.1.4. MODELO	51
3.2. POBLACIÓN Y MUESTRA	52
3.2.1. POBLACIÓN.....	52
3.2.2. MUESTRA	52
3.3. TÉCNICAS E INSTRUMENTO DE RECOLECCIÓN DE DATOS...	52
3.3.1. PARA LA RECOLECCIÓN DE DATOS	53
3.3.2. PARA LA PRESENTACIÓN DE DATOS	55

3.4. TÉCNICAS PARA EL PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN.....	55
CAPÍTULO IV	56
RESULTADOS	56
4.1. PROCEDIMIENTO DE DATOS	56
4.2. ANÁLISIS INFERENCIAL	62
CAPÍTULO V	65
DISCUSIÓN.....	65
CONCLUSIONES.....	68
RECOMENDACIONES	70
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	71
ANEXOS.....	81

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Especies vegetales empleadas para bio-acumular metales, citadas por Delgadillo Et Al. 2011	28
Tabla 2 Taxonomía del lupinus tomentosus.....	33
Tabla 3 Taxonomía del brassica rapa	34
Tabla 4 Principales funciones de los micronutrientes	41
Tabla 5 Denominación del suelo según el pH.....	46
Tabla 6 Conductividad eléctrica y clases de salinidad para una suspensión de suelo	46
Tabla 7 Eficacia de la fitoextracción de metales pesados en suelos contaminados, utilizando las especies de lupinus tomentosus y brassica rapa	49
Tabla 8 Técnicas e instrumento de recolección de datos	52
Tabla 9 Eficacia de la fitoextracción del lupinus tomentosus (chocho silvestre) y la brassica rapa (nabo silvestre) de metales pesados (plomo, zinc y plata) en suelos contaminados	56
Tabla 10 Eficacia del lupinus tomentosus (chocho silvestre) y brassica rapa (nabo silvestre) en la fitoextracción de absorción y acumulación de metales pesados (plomo, zinc y plata) en sus raíces de suelos contaminados	58
Tabla 11 Eficacia de la fitoextracción del lupinus tomentosus (chocho silvestre) y la brassica rapa (nabo silvestre) en la mejora de las propiedades químicas en suelos contaminados	60
Tabla 12 Crecimiento longitudinal del lupinus tomentosus (chocho silvestre) y la brassica rapa (nabo silvestre) en suelos contaminados con metales pesados de plomo (pb), zinc (zn) y plata (ag)	61
Tabla 13 Prueba estadística de rango con signo de wilcoxon, en la eficacia de la fitoextracción con la especie vegetativa de lupinus tomentosus (chocho silvestre) en metales pesados de plomo (pb), zinc (zn) y plata (ag) de suelos contaminados.....	62
Tabla 14 Prueba estadística de rango con signo de wilcoxon, en la eficacia de la fitoextracción con la especie vegetativa de brassica rapa (nabo silvestre) en	

metales pesados de plomo (pb), zinc (zn) y plata (ag) de suelos contaminados	62
Tabla 15 Prueba estadística de rango con signo de wilcoxon, en la eficacia de la fitoextracción del tratamiento 3 con especies vegetativas unificadas del lupinus tomentosus (chocho silvestre) y el brassica rapa (nabo silvestre) en metales pesados de plomo (pb), zinc (zn) y plata (ag) de suelos contaminados	63

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Proceso implicado en la fitoextracción.....	25
Figura 2 Los tipos de fitorremediación	28
Figura 3 Eficacia de la fitoextracción del lupinus tomentosus (chocho silvestre) y brassica rapa (nabo silvestre) de metales pesados (plomo, zinc y plata) en suelos contaminados	57
Figura 4 Eficacia del lupinus tomentosus (chocho silvestre) y brassica rapa (nabo silvestre) en la fitoextracción de absorción y acumulación de metales pesados (plomo, zinc y plata) en sus raíces de suelos contaminados.....	59
Figura 5 Eficacia de la fitoextracción del lupinus tomentosus (chocho silvestre) y la brassica rapa (nabo silvestre) en la mejora de las propiedades químicas en suelos contaminados	60
Figura 6 Crecimiento longitudinal del lupinus tomentosus (chocho silvestre) y la brassica rapa (nabo silvestre) en suelos contaminados con metales pesados de plomo (pb), zinc (zn) y plata (ag)	61

RESUMEN

La actividad de estudio tuvo como finalidad de valorar la eficiencia de la fitoextracción utilizando 2 especies de nombres, *Lupinus tomentosus* (Chocho silvestre) y *Brassica rapa* (Nabo silvestre) para mejorar la condición del suelo contaminado con Plomo, Zinc y Planta de la mina Carlu chino, ubicado en Perú. Es un estudio de tipo analítico con un nivel explicativo, prospectivo, longitudinal y experimental. El terreno contaminado de 6137.41 m² está constituida como población. Para la muestra se utilizó 150 kg de peso, con 75 maceteros muestrales (2 kg cada uno), 25 de ellos corresponde al primer tratamiento con la especie *Lupinus tomentosus* (Chocho silvestre), 25 muestras más para el segundo tratamiento con la especie *Brassica rapa* (Nabo silvestre) y los 25 últimos corresponden al tercer tratamiento de dos especies (*Lupinus tomentosus* y *Brassica rapa*). Obteniendo resultados, donde el Plomo disminuyo en porcentajes de 63.81%, 60.35% y 73.91% para las especies de *Lupinus tomentosus*, *Brassica rapa*, y la muestra unificada (*Lupinus tomentosus* y *Brassica rapa*), respectivamente. Asimismo, en el Zinc hubo disminución en porcentajes de 53.6%, 44.31% y 61.86%, con las especies *Lupinus tomentosus*, *Brassica rapa*, y la muestra unificada (*Lupinus tomentosus* y *Brassica rapa*), respectivamente. Para el mineral Plata, existió disminución en porcentajes de 80.62%, 79.93% y 61.86%, para las especies de *Lupinus tomentosus*, *Brassica rapa* y la muestra unificada (*Lupinus tomentosus* y *Brassica rapa*), respectivamente. Encontrando más eficacia de fitoextracción con el primer tratamiento (*Lupinus tomentosus*). Así mismo en la eficiencia de la fitoextracción de absorción y acumular los metales en las raíces de las vegetaciones, en (ppm) tenemos al *Lupinus tomentosus* con 102.07, 327.96 y 2.78, para los metales plomo, zinc y plata, respectivamente, seguido tenemos al *Brassica rapa* con 120.38, 321.25 y 2.73, para los metales Pb, Zn y Ag, respectivamente, así mismo para el tratamiento unificado (Chocho y Nabo silvestre) tenemos 56.99, 215.27 y 2.50, para los metales de Pb, Zn y Ag, respectivamente. Llegando a la conclusión que los tratamientos fueron eficaces y significativos para cada muestra.

Palabras claves: Fitoextracción, Eficacia, Suelo, Tratamiento, Contaminado.

ABSTRACT

The purpose of the study activity was to evaluate the efficiency of phytoextraction using two named species, *Lupinus tomentosus* (wild Chocho) and *Brassica rapa* (wild Turnip) to improve the condition of soil contaminated with Lead, Zinc and Plant from the Chinese Carlu mine, located in Peru. It is an analytical study with an explanatory, prospective, longitudinal and experimental level. The contaminated land of 6137.41 m² is constituted as population. For the sample we used 150 kg of weight, with 75 sample pots (2 kg each), 25 of them correspond to the first treatment with the species *Lupinus tomentosus* (wild Chocho), 25 more samples for the second treatment with the species *Brassica rapa* (wild turnip) and the last 25 correspond to the third treatment of two species (*Lupinus tomentosus* and *Brassica rapa*). The results showed that lead decreased in percentages of 63.81%, 60.35% and 73.91% for the species *Lupinus tomentosus*, *Brassica rapa*, and the unified sample (*Lupinus tomentosus* and *Brassica rapa*), respectively. Likewise, in Zinc there was a decrease in percentages of 53.6%, 44.31% and 61.86%, with the species *Lupinus tomentosus*, *Brassica rapa*, and the unified sample (*Lupinus tomentosus* and *Brassica rapa*), respectively. We found more phytoextraction efficiency with the first treatment (*Lupinus tomentosus*). Likewise, in the phytoextraction efficiency of absorption and accumulation of metals in the roots of the vegetation, in units of parts per million (ppm) we have *Lupinus tomentosus* with 102.07, 327.96 and 2.78, for the metals lead, zinc and silver, respectively, followed by *Brassica rapa* with 120.38, 321.25 and 2.73, for the metals lead, zinc and silver, respectively, likewise for the unified treatment (Chocho and wild turnip) we have 56.99, 215.27 and 2.50, for the metals lead, zinc and silver, respectively. We conclude that the treatments were effective and significant for each sample.

Keywords: Phytoextraction, Effectiveness, Soil, Treatment, Contaminated.

INTRODUCCIÓN

Preocupaciones ambientales son de importancia crítica a escala mundial, son causadas al contaminar los suelos con metales pesados, como plomo, zinc y platino. Estos contaminantes han sido usados como evidencias de las actividades mineras en el barrio Machcan, Distr. de San Francisco de Asís de Yarusyacan, específicamente el trabajo de la mina Carlu chino. Esto representa una amenaza para la salud del ecosistema y en general.

La presencia de plomo, zinc y plata en el suelo como resultado de la extracción minera de Carlu chino, se supone que es un problema para las comunidades cercanas para su salud, así como para la integridad del ecosistema local. Estos metales pesados plantean importantes retos para la recuperación de la zona afectada, ya que son muy tóxicos y persistentes en el suelo. Por lo tanto, es esencial encontrar soluciones sostenibles y eficaces para abordar este problema medioambiental.

De esta tesis la meta principal es determinar la eficiencia de la fitoextracción con tres tratamientos utilizando las especies vegetativas de nombres *Lupinus tomentosus* (Chocho silvestre) y *Brassica rapa* (Nabo silvestre) en la restauración la calidad de los suelos contaminados con plomo, zinc y plata en la región impactada por la mina, que comprende la localidad de Machcán en el departamento de Pasco y el distr. de San Francisco de Asís de Yarusyacán.

Los resultados proyectan que las especies vegetativas de nombres *Lupinus tomentosus* (Chocho silvestre) y *Brassica rapa* (Nabo silvestre) Es eficiente al reducir los niveles de plomo, zinc y plata de los suelos contaminados. Además, estas plantas parecen mejorar las características físicas del suelo sin alterar apreciablemente su composición química. Estos resultados avalan la viabilidad de la fitorremediación como método para mejorar la calidad de los suelos contaminados con metales pesados.

CAPÍTULO I

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

La corteza terrestre, los suelos y las plantas tienen concentraciones comparativamente altas de metales pesados. La contaminación es una pérdida única que se produce cuando cantidades peligrosas de sustancias están presentes en los suelos. Mayormente se encuentran en los suelos, son antropogénicos o geogénicos. Los elementos geogénicos proceden de la base rocosa, de la actividad volcánica o de la lixiviación de mineralización. Los residuos peligrosos, los procesos industriales, la minería, la agricultura y los residuos sólidos urbanos (RSU) son las fuentes de metales pesados antropogénicos (Hernández, 2012). De acuerdo con la ley, la contaminación se define como la que provocan estos contaminantes.

La civilización actual afronta un importante problema sobre la contaminación del suelo. Uno de los principales problemas que habrá que abordar en los próximos años es la caracterización, evaluación y rehabilitación de los suelos contaminados. Los contaminantes de los suelos se clasifican como peligrosos en función de su recurso, no sólo de su concentración global. La especiación se debe a la movilidad de los metales y está influida por una serie de factores geo-geo edáficos. (Galán y Romero, 2008).

En la forma natural de la corteza terrestre suelen encontrarse los metales pesados como minerales, sales u otros compuestos. Al carecer de los procesos metabólicos particulares que requieren los seres vivos, son difíciles de descomponer o eliminar orgánica o fisiológicamente. (Abollino, 2002).

Debido a su propensión a bioacumularse en diversos suelos de cultivo, los metales pesados se suponen a un riesgo. (Angelova, 2004).

Todavía quedan unos 110 millones de minas y otros restos de artillería sin explotar en 64 naciones de todos los continentes. Estos restos de guerra pueden matar a los agricultores y liberar metales pesados cuando se exponen a la intemperie. (FAO, 2018). Esto sucede a menudo, mayormente son las minas informales las que no hacen un cierre de minas y seguir con todas las normativas, para eliminar o reducir el impacto ambiental que dicha actividad

causa, este problema ambiental es perjudicial no solo para el suelo y agua, sino que también para los seres vivos, es una de las actividades que está provocando muchos daños a la naturaleza de la forma directa o indirecta y uno de los elementos principales más deteriorados es el suelo. Mediante el procedimiento de adsorción, complejación y precipitación, los metales pueden quedar retenidos en el suelo. Merece la pena abordar aquí la producción agrícola, principalmente por su importancia económica, nutricional y terapéutica, contando como base la supervivencia humana y la labor más significativa del suelo es su productividad. En términos cualitativos y cuantitativos un suelo contaminado de metales disminuye el crecimiento típico de la fauna del suelo y los microorganismos o modifica su diversidad (Porta et al. 1994). Esto hace que el sistema sea más frágil y provoca la transformación en el compuesto de los productos, lo que pone en riesgo la salud de los consumidores porque algunos de los elementos entran en la cadena alimentaria.

La actividad minera en el Perú sin duda es muy importante para los ciudadanos, ya que es una fuente de ingreso, pero, en el país se hace notorio la informalidad, incumpliendo leyes y sobre todo deteriorando el ambiente, muchos de ellos son mineros artesanales que arrasan con todo lo que hay, en la selva por ejemplo muchos árboles son destruidos, provocando la desestabilización y erosión del suelo, lo que causa sequías o inundaciones, cambios en el clima, disminución de la biodiversidad, etc... durante la actividad se va a observar como la actividad minera afecta al suelo dejando cada residuo del metal que es sustraído de la mina; para finalmente dejar todo a la intemperie sin ningún tratamiento final, sin el cierre de mina; simplemente son abandonadas las minas, dejando a su vez una tierra infértil. Normalmente, esta contaminación perturba el suelo, haciéndole perder su calidad y aptitud para el uso, ya que no es sometida a un tratamiento previo (BCRP, 2023).

La actividad minera representa el 32.1% del aporte total que se desarrollan en la región de Pasco (BCRP, 2023), Pasco tiene muchas empresas mineras, de ellas muchas informales que a lo largo han sido abandonadas sin ningún tratamiento luego de culminar con su trabajo. En el centro poblado de Machcan existen varias y una de ellas es la mina Carlu chino; el área afectada tiene una mala calidad de suelo, y un cambio en la

disposición de metales a largo plazo. En consecuencia, experimentó alteraciones en sus características fisicoquímicas, lo que disminuyó la fertilidad del suelo al disminuir su fauna y flora. Como consecuencia, se alteró la estructura del suelo. (Wheeler y Miller, 1990).

Se puede observar que las presencias de estos metales afectan, por lo general, una alteración del suelo la cual se manifiesta en una pérdida de calidad y aptitud para el uso (Roca, 2023). A menos que se traten antes de la degradación del suelo, los metales suelen tener efectos nocivos en el medio ambiente que pueden afectar directa o indirectamente al sistema edáfico. Dado que los metales pesados son tóxicos y se acumulan en los ecosistemas, su concentración es una señal significativa de la mala calidad del suelo. Entre otras cosas, el pH, la textura, las condiciones de oxidación-reducción y Estos metales afectan en el compuesto de la materia orgánica del terreno.

En términos generales, los metales pesados pueden entrar en el suelo de cuatro maneras: en primer lugar, quedan almacenado en el suelo, ocupando sitios de intercambio o disolviéndose en la fase acuosa; en segundo lugar, se adsorben en los constituyentes inorgánicos del suelo; en tercer lugar, se unen a la materia orgánica del suelo; y, en cuarto lugar, precipitan como sólidos puros o mezclados. Además, las plantas tienen la capacidad de absorberlos e incorporarlos a las cadenas tróficas. (García y Dorronsoro, 2005).

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.2.1. PROBLEMA GENERAL

- ¿Es eficaz la fitoextracción de metales pesados (plomo, zinc y plata) en suelos contaminados, utilizando las especies de nombres *Lupinus tomentosus* (Chocho silvestre) y *Brassica rapa* (Nabo silvestre) en el 2023?

1.2.2. PROBLEMAS ESPECÍFICOS

- ¿Cuál es la eficacia de la fitoextracción de metales pesados (plomo, zinc y plata) en suelos contaminados, utilizando la especie de nombre *Lupinus tomentosus* (Chocho silvestre)?
- ¿Cuál es la eficacia de la fitoextracción de metales pesados (plomo, zinc y plata) en suelos contaminados, utilizando la especie de nombre *Brassica rapa* (Nabo silvestre)?
- ¿Cuál es la eficacia de la fitoextracción de metales pesados (plomo, zinc y plata) en suelos contaminados, utilizando dos especies de nombres, *Lupinus tomentosus* (Chocho silvestre) y *Brassica rapa* (Nabo silvestre)?

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. OBJETIVO GENERAL

- Determinar la eficacia de la fitoextracción de metales pesados (plomo, zinc y plata) en suelos contaminados, utilizando las especies de nombres *Lupinus tomentosus* (Chocho silvestre) y *Brassica rapa* (Nabo silvestre).

1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Evaluar la eficacia de la fitoextracción de metales pesados (plomo, zinc y plata) en suelos contaminados, utilizando la especie de nombre *Lupinus tomentosus* (Chocho silvestre).
- Evaluar la eficacia de la fitoextracción de metales pesados (plomo, zinc y plata) en suelos contaminados, utilizando la especie de nombre *Brassica rapa* (Nabo silvestre).
- Evaluar la eficacia de la fitoextracción de metales pesados (plomo, zinc y plata) en suelos contaminados, utilizando dos especies de nombres, *Lupinus tomentosus* (Chocho silvestre) y *Brassica rapa* (Nabo silvestre).

1.4. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

El actual estudio examinó la eficacia de la fitoextracción utilizando dos plantas, *Brassica rapa* y *Lupinus tomentosus*, que, debido a sus rasgos fisiológicos, se adaptan sin complicarse a las condiciones del suelo y mantienen la humedad y la humedad, al tiempo que minimizan la contaminación por metales pesados de los suelos, donde por ende existió una mejoría en la calidad del suelo. Las actividades mineras ilegales en muchas ocasiones dejan a la intemperie los desechos minerales que son dejados en el suelo, estos metales no solo son peligrosos para el suelo, sino que también son arrastrados por la lluvia a las quebradas, ríos o lagos que se encuentren cerca del lugar o simplemente son filtrados a aguas subterráneas, del mismo modo afecta a los suelos de cultivo mediante la escorrentía.

En consecuencia, es requerido buscar alternativas de remediación sostenibles. La naturaleza lo muestra en frecuencia por el incremento de algunas especies vegetales en estas zonas contaminadas y por el hecho de que otras especies pueden crecer en entornos difíciles. No obstante, la mayoría de las plantas no han sido examinadas en cuanto a su funcionalidad de fitoextracción o fitoestabilización de metales pesados, lo que constituye un importante campo de investigación. En ese sentido el presente trabajo se experimentó con dos especies vegetativas de nombres, *Lupinus tomentosus* (Chocho silvestre) y *Brassica rapa* (Nabo silvestre) donde sirvió como aporte al desarrollo técnico en descontaminación de suelos de metales pesados, mediante la eficacia de la fitoextracción, observando cambios positivos en el suelo y mejorando su calidad.

1.5. VIABILIDAD DE LA INVESTIGACIÓN

1.5.1. VIABILIDAD OPERATIVA

La disponibilidad de un asesor y la logística necesaria (La mano de obra, movilidad, materiales y suministros) hicieron posible el desarrollo operativo de la investigación.

1.5.2. VIABILIDAD ECONÓMICA

El costo de las actividades del proyecto de investigación (elaboración, ejecución y presentación) así como también el gasto en compras de plantas vegetativas y análisis de los suelos, el investigador fue el que financio en su totalidad.

1.5.3. VIABILIDAD AMBIENTAL

La eficacia de la fitorremediación de metales pesados (plomo, zinc y plata) en suelos contaminados, utilizando las especies de nombres *Lupinus tomentosus* (Chocho silvestre) y *Brassica rapa* (Nabo silvestre), contribuyo en minimizar el impacto de la contaminación del recurso suelo, así mismo permitió que se reestablezca la vegetación en los sitios contaminados. Se trabajó con plantas herbáceas con características de rápido crecimiento y de vivencia anual, donde estas vegetaciones tienen bondades de ser renovadores de suelos.

1.5.4. VIABILIDAD SOCIAL

Esta actividad de investigación fue viable, al sentido del beneficio a los pobladores cercanos al área del suelo contaminado, donde se permitió recuperar zonas contaminadas por metales pesados de plomo, zinc y plata.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

2.1.1. ESTUDIOS NACIONALES

Sandoval (2019) *Urtica Urens* L. y *Brassica rapa* L., dos especies altoandinas, se comparan de la rehabilitación del terreno contaminado con plomo en Cátac, Áncash. En los últimos años se ha visto el uso de especies altoandinas para la rehabilitación de suelos in situ, cuyo objetivo es restaurar la calidad del suelo sin alterar el equilibrio del hábitat y la armonía del paisaje. Las plantas *Urtica urens* L. y *Brassica rapa* L., que crecen en 4.000 msnm, se utilizan por sus propiedades fitorremediadoras, en particular mediante la fitoestabilización. La conductividad eléctrica, la materia orgánica, la acumulación de plomo en las especies o factores como el índice de tolerancia y el factor de translocación son los principales criterios evaluados en un suelo degradado según la técnica. Del mismo modo, se ofrecen detalles sobre las operaciones mineras en el distrito de Cátac, junto con la estructura normativa que las explica. En resumen, este artículo de revisión intenta cerrar lagunas teóricas en relación con las capacidades de fitorremediación de las dos especies elegidas, ofreciendo bases conceptuales para futuras investigaciones.

Carbajal y Quispe (2019) Para conocer la funcionalidad de bioacumulación de plomo y cromo a partir de relaves mineros, utilizó la planta *Brassica Juncea* (Mostaza) en su tesis, Fitoextracción de Pb y Cr a partir de relaves mineros de la laguna Santa Catalina en el distrito de Quiruvilca, Santiago de Chuco. La metodología se dividió en 4 procesos (T1, T2, T3 y T4), así como un control. A cada tratamiento se le añadió un sustrato orgánico en porcentajes del 100%, 75%, 50% y 25% de los residuos con el sustrato y los adyuvantes. Cada tratamiento tenía cuatro réplicas y el periodo de exposición fue de 40 días, con 2 cosechas a los 20 y 40 días, respectivamente. En cada temporada de cosecha se midió el peso seco de los órganos de la planta y la longitud de la raíz, y cada

tres días se contó el número de hojas para examinar las características de desarrollo. Los metales pesados presentes en las plantas se examinaron con el espectrómetro de masas de plasma acoplado inductivamente de la Escuela de Ingeniería Medioambiental. Los resultados muestran que, a pesar a la poca disponibilidad de materia orgánica y nutrientes, los tratamientos con mayor concentración de residuos dificultan el incremento sano de los vegetales y la producción de biomasa. En términos de bio acumulación de metales pesados, el tratamiento T3 presentó las mejores condiciones de fitoextracción, obteniendo la raíz una mayor concentración de Pb y las hojas acumulando más Cr. La raíz presentó 8 mg/Kg MS de Cr y las hojas 23,35 mg/Kg MS de Cr. Se ha determinado que la capacidad de *Brassica juncea* para acumular metales con el sustrato orgánico que utiliza puede ser una buena forma de favorecer su crecimiento y potenciar su fitoextracción de suelos contaminados. Fue factible investigar los resultados de la fitoextracción de Cr utilizando ácido picolínico (PA) y ácido etilendiaminodisuccínico (EDDS) como agentes quelantes y como inductores de la actividad de *Salix viminalis* L., *Brassica juncea* L. y *Cistus ladanifer* L. Las partes aéreas de *Brassica juncea* L. acumularon índices de tolerancia superiores al 80% en comparación con su raíz.

Vega (2018) Usando las plantas silvestres chocho (*Lupinus tomentosus*) y llantén (*Plantago mayor*) provenientes de los relaves de la planta concentradora de mineral Santa Rosa de Jangas; Huaraz - Ancash, se evaluó la funcionalidad de fitoacumulación de Zinc (Zn) y Plomo (Pb). Esto con el fin de determinar la habilidad de los vegetales *Plantago Mayor* y *Lupinus Tomentosus* para absorber, acumular metales pesados como Zn y Pb en sus tejidos y crecer. Como parte de la metodología se instaló un invernadero durante unos siete meses. Con cinco tratamientos y tres repeticiones, se empleó un diseño experimental completamente aleatorizado en 15 unidades experimentales en invernadero. Se recogieron muestras de relaves de tierras agrícolas de Wilcahuain y en la instalación concentradora de Santo Rosa de Jangas Ancash. Debido a los numerosos factores ambientales de la región de Ancash, existe una importante presencia de concentraciones de metales. Estos

tratamientos se encontraron en el rango de pH ácido de 4,61 a 5,23, y los metales son generalmente más biodisponibles en estas fracciones de pH. Las dos especies fueron capaces de fitoestabilizar Pb y Zn en un pH ácido, con Zn en a (pH -4,65) y Pb en a (pH -5,23), respectivamente; en ambos casos, las especies acumularon mayor concentración en la parte radicular.

2.1.2. ESTUDIOS REGIONALES

Dávila (2020) La restauración de suelos contaminados con Plomo con Vetiveria (*Chrysopogon Zizanioides*) en La Esperanza, Huánuco; el objetivo de este análisis es determinar si los suelos contaminados con plomo en La Esperanza pueden ser recuperados con vetiveria bajo condiciones de vivero. Se utilizó un prototipo experimental compuesto por 3 tratamientos (T1: seis estacas, T2: ocho estacas y T3: doce estacas vegetales con cinco repeticiones). El resultado fueron quince unidades experimentales. Las variantes evaluadas fueron la cantidad y la longitud de los macollos y las hojas de vetiveria, así como la concentración residual de plomo. Aunque la bioenergía aérea de vetiveria, que se mide por el número y la longitud de los macollos y las hojas por planta, se redujo al inicio del ensayo, las plantas demostraron capacidad de aguante aun teniendo las condiciones desfavorables del suelo. La respuesta muestra en la resistencia de las plantas de vetiveria no se describió estadísticamente en la concentración residual de plomo, que a partir de las observaciones del suelo contaminado indica un aumento del plomo. En conclusión, para acreditar la movilidad del plomo en la solución del suelo y controlar la asimilación del plomo por las plantas de vetiveria, se aconseja un nuevo estudio que tenga en cuenta examinar de la materia orgánica y el pH del suelo o sustrato de las macetas.

Ordoñez (2019) La meta de esta actividad fue determinar los efectos residuales de plomo y cadmio en hortalizas (*Lactuca sativa*, *Daucus carota* y *Apium graveolens*) comercializadas en el nuevo mercado de Huánuco. Adicionalmente, se buscó determinar los efectos residuales en hortalizas (lechuga, zanahoria y apio) comercializadas en

el nuevo mercado de Huánuco. Se recogieron muestras de los cuatro lugares designados a lo largo de tres periodos de tiempo para investigar las concentraciones de plomo y cadmio de efecto residual y se enviaron al laboratorio de agua, suelo y ecotoxicología de la Universidad Nacional Agraria de La Selva para su análisis de las muestras. Los resultados medios de las cantidades de plomo en las hortalizas de hoja fueron los siguientes: 4,18 ppm, apio 3,79 ppm y zanahoria 6,15 ppm. Por término medio, el apio tiene 0,10 ppm de cadmio, las zanahorias 0,09 ppm y la lechuga 0,11 ppm. Se encontraron 6,4 ppm, 6,99 ppm, 5,84 ppm y 4,96 ppm de plomo en las zanahorias; 3,45 ppm, 5,08 ppm, 3,12 ppm y 2,31 ppm en el apio; y 5,06 ppm, 2,93 ppm, 4,59 ppm y 2,92 ppm en las lechugas. Las concentraciones de efecto residual del cadmio fueron las siguientes: la lechuga 0,10 ppm y en los puntos restantes no presentan el efecto residual -0,13, ppm, -0,18 ppm y -0,14 ppm; zanahoria 0,03 ppm y en los restantes -0,03, ppm, 0 ppm y -0,06 ppm; apio- 0,02 ppm y 0,01 y en los restantes -0,02, ppm, 0 ppm y -0,003 ppm.

Fernández (2019) Determinar si las especies vegetales autóctonas de la comunidad de Picuruyacu Alto, distrito de Castillo Grande, provincia de Leoncio Prado, departamento de Huánuco, acumulan cadmio. Una modalidad de bajo costo en desarrollo para la limpieza de ambientes contaminados es la llamada fitorremediación, que aprovecha la habilidad de las plantas para absorber o soportar metales pesados. El propósito de este estudio es identificar, de manera descriptiva, los vegetales nativos que acumulan cadmio en la comunidad de Picuruyacu Alto, en el departamento de Huánuco, provincia de Leoncio Prado. Para la metodología se recolectaron cuatro ejemplares de cada especie vegetal herbácea. Las muestras incluyeron el tallo (tallo, hoja, flor y semillas) y el sistema radicular (raíz) para su análisis y determinación fisicoquímica y morfológica. En los resultados se encontraron siete especies de plantas autóctonas tolerantes: *Browallia americana* de la familia Solanaceae, *Philoglossa mimuloides* y *Ageratina* cf. *azangaroensis* de la familia Asteraceae, *Commelina diffusa* de la familia Commelinaceae, *Borreria prostrata* y *Diodia alata* de la familia Rubiaceae, y *Euphorbia heterophylla* de la familia Euphorbiaceae. Por el contrario, se

encontraron dos especies de plantas autóctonas acumuladoras: *Cyathula prostrata* de la familia *Amaranthaceae* y *Cyperus simplex* de la familia *Cyperaceae*. En conclusión, se debe prevenir el consumo de dichas especies, y usar para la mejoría de los suelos contaminados por metales.

2.2. BASES TEÓRICAS

2.2.1. FITORREMEDIACIÓN

En este sentido, la fitorremediación se refiere al uso de las plantas o vegetales para reparar los daños y el término fue definido en 1991, por lo que es relativamente nuevo. Tiene la palabra griega *phyto*, que significa vegetal o planta, y de la palabra latina *remediare*, que significa reparar o reparar algo (Agudelo, Macías & Suárez, 2005; Núñez, 2002). Se puede describirse en términos generales como una colección de tecnologías que emplean diferentes vegetales que poseen la habilidad bioquímica y fisiológica para absorber, metabolizar, desintoxicar o inmovilizar metales pesados. (Freire, 2008), Para transformar los contaminantes del suelo, el agua o el aire en formas menos peligrosas, se pueden utilizar sustancias orgánicas, radiactivas y petroderivadas (Aros, 2007; Batista & Sánchez, 2009; Núñez, Meas, Ortega & Olguin, 2004; López, Gallegos, Pérez & Gutierrez, 2005; Ghosh & Singh, 2005; Lumelli, 2006). Esta táctica es planteada para una tecnología alternativa, sostenible y asequible para la restauración de entornos y efluentes contaminados o degradados. (Ercoli et al., 1999; Núñez et al., 2004). También se denomina así a la habilidad de ciertas plantas (leñosas, acuáticas, terrestres, etc.) para eliminar, transformar o contener contaminantes del medio ambiente (Lumelli, 2006).

En general, la fitorremediación es una técnica novedosa que implica el cultivo de árboles o plantas en sitios infectados o degradados para limpiar el agua, el suelo o el aire.

Es una variación de biorremediación que aún no se ha utilizado ampliamente o los resultados de su aplicación están plenamente documentados. (Freire, 2008). Actualmente, un procedimiento eficaz

para la recuperación de zonas está surgiendo del intento de aceptar el uso de formas alternativas. Es respetuosa y técnica pasiva con el medio ambiente que utiliza la energía solar y puede utilizarse junto con los métodos mecánicos tradicionales o, en algunos casos, en lugar de éstos. Se recomienda porque Usualmente no distorsiona los ecosistemas a tratar, que ya se han adaptado a sus condiciones de degradación o contaminación; la recuperación se lleva a cabo sin afectar a la biota y el paisaje; y la inoculación de microorganismos en las zonas que se van a recuperar ha mejorado su eficacia. (Barrientos, 2012; Torres & Zuluaga, 2009).

2.2.1.1. TIPOS DE FITORREMEDIACIÓN

Se ha desarrollado una terminología basada en los mecanismos primarios y la función de las plantas en el proceso de fitorremediación. (Carpena & Bernal, 2007; Muñoz et al., 2010; EPA, 1999; Núñez et al., 2004; Mentaberry, 2009), que tienen pautas específicas que están dictadas principalmente por la categorías de contaminantes, la diversidad microbiana y las características del suelo (Ferrera et al., 2007); se utilizan para los metales pesados, incluidos los metaloides, la fitovolatilización, la fitoestabilización, la fitoextracción o la rizofiltración, Los radionucleidos y algunos tipos de contaminantes orgánicos; y la fitodegradación y la fitoestimulación se utilizan para los contaminantes orgánicos.(Núñez et al., 2004). Las formas de fitorremediación han sido caracterizadas o categorizadas de manera diferente por varios escritores; a continuación, se proporciona una explicación rápida basada en las técnicas sugeridas por la EPA (1999), complementadas con declaraciones de algunos autores. (Carpena & Bernal, 2007; Muñoz et al., 2010; EPA, 1999; Vidali, 2001; Brandt, 2003; Núñez et al., 2004; López et al., 2005; Ghosh & Singh, 2005; Lumelli, 2006; Mentaberry, 2009).

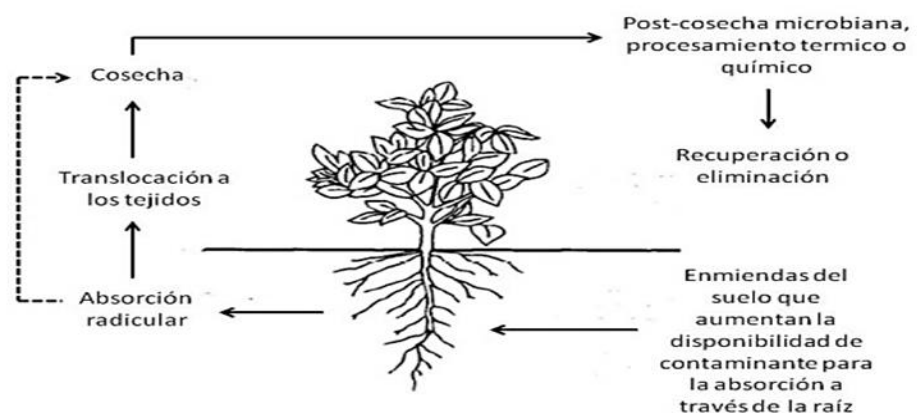
a) Fitoextracción

Tiene la habilidad de ciertas plantas para almacenar contaminantes en sus raíces, tallos o hojas y también se conoce como fitoacumulación. Además de algunos contaminantes orgánicos y elementos e isótopos radiactivos, se emplea sobre todo para los metales pesados. Se realiza típicamente empleando plantas llamadas metalofitas, también llamadas hiperacumuladores (acumuladores de metal). Se pueden utilizar una o más plantas, y después de crecer durante unas semanas o meses, los metales pueden ser cosechados, quemados o compostados. Las cenizas de las plantas en llamas deben tratarse como residuos peligrosos, pero representan menos del 10% del volumen de suelo que se produciría si el suelo fuera excavado para su tratamiento. Hasta que se alcancen niveles manejables, este proceso puede repetirse según sea necesario. (EPA, 1999; Núñez et al., 2004; López et al., 2005).

Ramírez (2015) definido como el proceso por el cual los metales son absorbidos y trasladados de las raíces de una planta a sus partes aéreas. Además, es el proceso por el cual son absorbidos por las raíces de la planta y retenidos en las hojas, tallos y raíces los metales contaminados.

Figura 1

Proceso implicado en la fitoextracción



Nota: La figura muestra el proceso en la fitoextracción de contaminantes del suelo (Cunningham et al., 1995).

b) Rizo filtración

Se trata de las raíces que absorben contaminantes del entorno. Por ello, los vegetales se cultivan en invernaderos y se plantan en la zona contaminada, donde las raíces absorben el contaminante y el agua. Para asimilar, precipitar y concentrar metales pesados de aguas residuales contaminadas, se basa en la producción de raíces hidropónicas con altas tasas de crecimiento y superficie de plantas terrestres.

c) Fitoestabilización

Puede utilizarse para restaurar zonas que han sido físicamente perturbadas o donde la vegetación no exista por causa a las elevadas concentraciones de metales presentes en los suelos superficiales. Debido a sus altas tasas de evapotranspiración, las plantas funcionan al extraer la humedad del suelo como una bomba solar. Este proceso también mantiene la zona de la rizosfera constantemente húmeda, creando el ambiente ideal para la inmovilización del metal mediante reacciones químicas o mecanismos físicos como la adsorción.

d) Fitodegradación

Los hidrocarburos aromáticos polinucleares, los hidrocarburos totales del petróleo, los pesticidas, los productos químicos clorados, los explosivos y los tensioactivos (detergentes) son algunos de los contaminantes orgánicos que se tratan mediante fitotransformación, que es otro nombre que recibe. Consiste en la descomposición de los contaminantes que las plantas absorben a través de procesos metabólicos internos. Los contaminantes se degradan o transforman parcial o totalmente por reacciones enzimáticas llevadas a cabo por microbios y plantas. Este proceso permite que los contaminantes se fijen a su morfología celular como la lignina o sean absorbidos por las plantas y mantenidos en sus vacuolas. Los contaminantes se almacenan o se descomponen bioquímicamente en compuestos menos tóxicos,

o se descomponen e integran en tejidos vegetales y se utilizan como nutrientes.

e) Rizo degradación

También se denomina biodegradación rizosférica acelerada o fitoestimulación. Se trata de la degradación microbiana de los contaminantes del suelo; los exudados radiculares favorecen el desarrollo de microorganismos son capaces de degradar los orgánicos contaminantes.

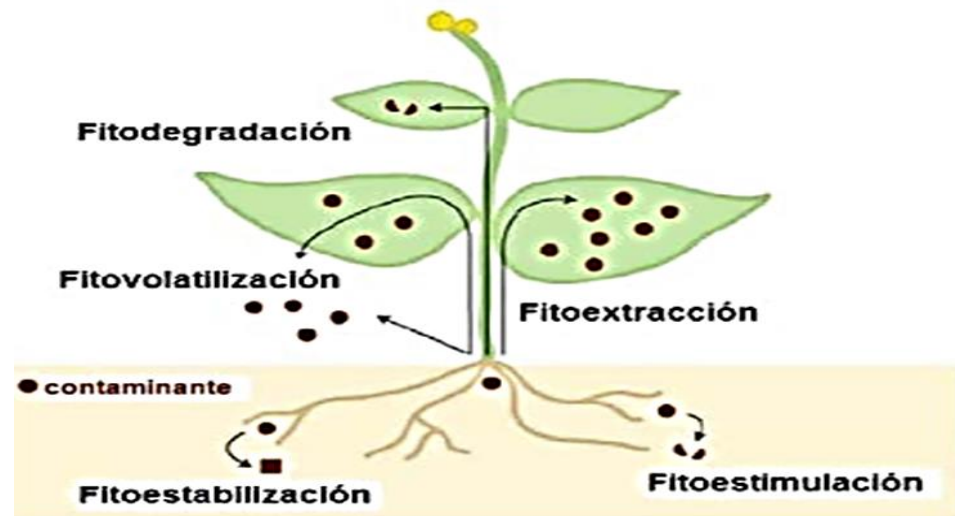
Los aminoácidos, azúcares simples, compuestos alifáticos y aromáticos, nutrientes, enzimas y oxígeno son liberados por las vegetales a través de sus procesos fisiológicos y metabólicos. Estas sustancias se trasladan desde las partes superiores de la planta hasta la raíz, donde estimulan la creciente de hongos y bacterias, que a su vez provocan la mineralización de contaminantes. En comparación con la fitodegradación, la rizodegradación se produce mucho más lentamente.

f) Fitovolatilización

Consiste en que la planta absorbe y transpira un contaminante, algunos de los cuales pueden volatilizar el mercurio o el selenio que se ubican en el suelo, los sedimentos o el agua. En cantidades relativamente menores, varios elementos pueden volatilizarse en el medio ambiente tras sufrir. Como es evidente, los procesos metabólicos y fisiológicos de las plantas, así como, en ocasiones, sus interacciones con los microbios a lo largo del proceso de restauración son la base de la fitorremediación. De ello se desprende claramente que el proceso es intrincado e implica a los vegetales y a las comunidades microbianas conectadas a su sistema radicular. (EPA, 1999; Núñez et al., 2004; López et al., 2005).

Figura 2

Los tipos de fitorremediación



Nota: Es representación esquemática de los distintos mecanismos de fitorremediación (Díez, 2009).

2.2.2. ESPECIES UTILIZADAS PARA FITOACUMULACIÓN

Según datos recogidos por múltiples autores y recogidos por Delgadillo et al. (2011, pp. 601) en su trabajo Fitorremediación: una opción para quitar la contaminación, en la siguiente tabla se enumeran una serie de especies vegetales, identificadas por su nombre científico, que contienen la habilidad de acumular metales pesados.

Tabla 1

Especies vegetales empleadas para bio-acumular metales, citadas por Delgadillo Et Al. 2011

Especie Vegetal	Metal pesado	Referencia Bibliográfica
<i>Thlaspi caerulescens</i>	Cd, Hg	Schwartz et al., 2003, pp. 27.
<i>Vertiveria zizanioides</i>		Brandt et al., 2006, pp. 278.
<i>Sedum alfredii</i> , y <i>Viola baoshanensis</i>	Zn, Cd, Pb	Wu et al., 2007, 135. Boonyapookana et al., 2005, pp. 127.
<i>Brassica juncea</i> , <i>Helianthus annuus</i>	Pb, Cr, Cd	Pilon-Smits et al., 1999, 123-132. Sharma et al., 2004, pp. 2069

<i>Brassica napus</i> ,	Cu, Pb, Cd, Zn	Wenzel et al., 2003, 83-96;
<i>Brassica rapa</i>		Agostini et al., 2003, 139-144;
<i>Pistia stratiotes</i>	Cd, Cu, Ni, Pb, Zn	Chandra & Kulshreshtha, 2004, pp. 313-327.

Nota: Adaptado de Rosales Arévalo y Villavicencio Criollo (2018).

2.2.3. BIODISPONIBILIDAD DE METALES PESADOS

La capacidad de un elemento para llegar a un organismo vivo desde cualquier zona del suelo se conoce como biodisponibilidad. La forma, la cantidad de cargas y la energía de retención de los metales pesados afectan a la movilidad, que es la capacidad de desplazar metales a través de compartimentos. (Reid, 2001).

Sin embargo, según Kabata y Pendias (2000), se ven afectados por los elementos externos como el pH, la temperatura, la humedad y el entorno químico. También pueden estar relacionados al usar con el suelo; por ejemplo, los metales se movilizan más ligero en los suelos forestales que en los agrícolas, lo que está directamente relacionado con los mayores niveles de acidez del suelo y la mayor concentración de materiales orgánicos de bajo peso molecular.

Lindsay (1979) Explica que las concentraciones de metales pesados y elementos afines en las etapas bioasimilables -solución del suelo y formas adsorbidas- aumentan directamente la probabilidad de que un suelo se convierta en peligroso.

Esta fracción utilizable será comparable a la extraída mediante EDTA (ácido edético) o DTPA (ácido pentacético), y los distintos niveles de toxicidad deberán compararse con ella. Sin embargo, debido a la dificultad de extracción, la normativa prefiere evaluar la cantidad total de componentes nocivos presentes.

Kabata y Pendias (2000) Dilucidar cómo afecta el carácter químico de los contaminantes en el momento de la importación a su especiación y localización en el suelo, ya que esto controlará tanto su disponibilidad (si están disueltos, adsorbidos, ligados o precipitados) como su nivel de toxicidad. Además, el efecto contaminante tiene un impacto significativo. Sin embargo, Pilon (2005) señala que las características químicas, las

características del suelo, la actividad biológica y los factores ambientales afectan a la biodisponibilidad de un contaminante.

2.2.4. PLANTAS DESARROLLADAS EN AMBIENTES

2.2.4.1. CONTAMINADOS POR METALES PESADOS

Durante muchos años, una diversificada y amplia variedad de especies, que puede o no ser fitogeográficamente diferente a las plantas circundante en los terrenos no contaminados, puede incluso mantenerse en algunas partes de suelos contaminados por metales (Baker, 1987).

Aunque el desarrollo de taxones tolerantes parece ser un hecho generalizado, Bradshaw y Tumer (1971) sostienen que es importante considerar si las especies pueden colonizar zonas contaminadas y son naturalmente resistentes a los metales, incluyendo cuando no crecen en terrenos contaminados.

Según Becerril (2007), las metalófitas son especies vegetales que poseen sistemas fisiológicos mejorados para soportar y prosperar en áreas que contienen altas concentraciones de metales.

Estas plantas son oriundas de regiones con afloramientos naturales de minerales metálicos porque sólo pueden encontrarse en suelos con concentraciones significativas de metales pesados. Según Ginocchio y Baker (2004), tienen un área de distribución geográfica muy reducida y sólo se han recolectado unas pocas veces en algunas situaciones. Su elevada tasa de extinción o declive poblacional se debe en gran medida a esta restricción geográfica, especialmente cuando se implanta la minería. Esto se traduce en la pérdida de estas especies y/o de genotipos (ecotipos) de la variedad de seres que han evolucionado mecanismos de subsistencia en este tipo de suelos a lo largo de cientos, miles o incluso millones de años. (Ginocchio y Baker, 2004).

2.2.5. TOLERANCIA DE PLANTAS HACIA LOS METALES PESADOS

Macnair (2002) muestra que la capacidad de prosperar en suelos peligrosos para otras plantas es un signo de margen a los metales pesados. Esta capacidad se manifiesta por una combinación del genotipo y el entorno que influye en la supervivencia de la planta.

La mayoría de los mecanismos de tolerancia son internos: las plantas cultivadas en sustratos metalíferos absorben metales, lo que da lugar a un conjunto de adaptaciones fisiológicas y bioquímicas que evolucionan en distinto grado para diversos metales en diversas especies y poblaciones. (Baker, 1987).

2.2.6. LA BASE GENÉTICA A LA TOLERANCIA

Bradshaw y Mcneilly (1985) muestra que la capacidad de prosperar en suelos peligrosos para otras plantas es un signo de tolerancia a los metales pesados. Esta capacidad se manifiesta por una combinación del genotipo y el entorno que influye en la supervivencia de la planta.

La capacidad de un genotipo para responder de manera maleable y/o estable en una serie de condiciones ambientales se conoce como flexibilidad fenotípica. La respuesta plástica de las plantas se entiende como un valor en la literatura botánica (Kuiper, 1984).

Bradshaw y Mcneilly (1985) implican, en consonancia con lo anterior, que el relevante componente genético aditivo que regula la diversidad en la tolerancia hace que el cimienta genético en la tolerancia a los metales pesados sea heredable, lo que implica una rápida respuesta a la selección. Según estos científicos, las comunidades que nunca se habían enfrentado a la toxicidad de los metales y que, por tanto, eran intolerantes, debieron dar lugar a poblaciones tolerantes a los metales. Según esto, la elección natural puede producir fácil una población adaptada, pero sólo si la población inicial posee la variedad requerida; de lo contrario, la selección natural no tendría ningún impacto evolutivo.

Dado que residen cerca y dispersan sus semillas a zonas contaminadas, muchas especies son incapaces de procesar tolerancia por falta de variedad y no por falta de selección natural. Teniendo esto

en cuenta, también es fundamental tener en cuenta el flujo de genes de suelos sanos a suelos contaminados por metales pesados, que puede disminuir la tolerancia. Sin embargo, debido a la fuerte selección que se produce y que anula el impacto del flujo genético, esto es poco frecuente en las regiones mineras. (Bradshaw y Mcneilly, 1985).

Baker (1987) Se dice que la flora que ha crecido en suelos contaminados por minas en zonas mineras que se menciona a dos tipos de distribución: especies que se encuentran fuera de las plantas metalíferas y taxones que han crecido en las minas.

Antonovics, Bradshaw y Turner (1971) Pocos autores sostienen que los taxones cultivados en las zonas mineras son neoendémicos, lo que significa que se originaron en lugares concretos en respuesta a condiciones ambientales específicas, mientras que otros señalan que son paleoendémicos, lo que significa que antes estaban ampliamente distribuidos, pero ahora están restringidos a una zona específica.

Además, proponen que los taxones de las minas pueden ser neoendémicos debido a una evolución concurrente en la tolerancia a los metales y la vegetación circundante.

2.2.7. ESPECIFICIDAD DE LA TOLERANCIA A LOS METALES

Numerosos estudios han mostrado que la asimilación de metales de diversas especies vegetales varía significativamente, al igual que los genotipos de las distintas especies (Prasad y Hagemeyer, 1999).

Sin embargo, para un lugar se eligen las especies que son competitivas en el entorno local y que pueden resistir mejor la toxicidad de la contaminación (Ginocchio y Baker, 2004).

La tolerancia es un rasgo heredable y fijado genéticamente. En consecuencia, determinadas semillas de plantas pueden emplearse sin perder su eficacia (Bradshaw, 1982).

2.2.8. TOLERANCIA MÚLTIPLE

La tolerancia es exclusiva de un metal determinado y no siempre se traduce en un nivel notable de tolerancia en otros metales. (Williamson, Johnson y Bradshaw (1982).

Por lo tanto, hay algunas excepciones, ya que a veces las plantas pueden colonizar suelos contaminados por múltiples metales. Aunque algunas poblaciones son tolerantes a un solo metal, otras son resistentes a dos metales, como Pb y Zn o Cu y Pb (Bradshaw, 1884).

2.2.9. ESPECIES VEGETATIVAS

2.2.9.1. EL LUPINUS TOMENTOSUS

Tabla 2

Taxonomía del lupinus tomentosus

Clasificación		Descripción
Reino	:	Plantae
División	:	Tracheophyta
Clase	:	Magnoliopsida
Orden	:	Fabales
Familia	:	Fabaceae
Genero	:	<i>Lupinus</i>
Especie	:	<i>Lupinus tomentosus</i>
Nombre común	:	Chocho Silvestre

Nota: GBIF Secretariat. (2023).

a) DESCRIPCIÓN

Lupinus tomentosus es una planta perenne que se adapta bien a climas áridos y suelos pobres, como los serpentinizados, donde su capacidad para tolerar metales pesados la hace particularmente resiliente. Esta especie produce flores de color azul brillante dispuestas en espigas, lo cual, además de su uso práctico, la convierte en una opción popular para jardines ornamentales. Sus semillas pequeñas y marrones son empleadas en la propagación, que generalmente se realiza en primavera mediante siembra directa en trincheras poco profundas (Selina Wamucii, 2023).

- **Identificación:** *Lupinus tomentosus*, conocido como Woolly Lupine, es una oriunda planta de Norteamérica que crece entre 0.3 y 1 metro de altura y se caracteriza por sus flores azul brillante organizadas en espigas (Selina Wamucii, 2023).

- Usos: Se utiliza como planta ornamental en jardines, como forraje para ganado y en curaciones tradicionales en los tratamientos a las afecciones de la piel, mejorar la digestión y reducir la inflamación (Selina Wamucii, 2023).

2.2.9.2. EL BRASSICA RAPA

Tabla 3

Taxonomía del brassica rapa

Clasificación	Descripción
Reino	Plantae
División	Magnoliophyta
Clase	Magnoliopsida
Orden	Brassicales
Familia	Brassicaceae
Genero	Brassica
Especie	<i>Brassica rapa</i>
Nombre común	Nabo Silvestre, Yuyo

Nota: (Zambrano, 2015).

En el caldo gallego, sus hojas (conocida también como nabiza) que sustituyen a los grelos que en realidad las hojas son de dos tipos, Blanco de Lugo y Temprano de Santiago, que se utilizan principalmente para este fin. Una hortaliza que se da excepcionalmente bien en ambientes fríos es el nabo silvestre (*Brassica rapa*). Pertenece a la familia de las crucíferas, que cuenta con 380 géneros y más de 3.000 especies autóctonas de los climas moderados o fríos del hemisferio norte. Esta familia de vegetales, que también incluye berros y coles, es importante porque contiene compuestos de azufre, que son potentes antioxidantes que ayudan en la prevención de enfermedades. Debido a su succulenta raíz napiforme, el nabo, un brasicácea, se cultiva con frecuencia como verdura en regiones templadas de todo el mundo.

Mientras que los tipos más grandes se utilizan como alimento para animales, los más jóvenes son consumidos por los seres

humanos. Los grelos son un tipo de hoja que se asemeja a las hojas de mostaza (Zambrano, 2015).

a) Morfología

- **Raíz:** Puede ser delgada, pero su categoría de raíz napiforme es extremadamente típico para la formación de sustancias de reserva. delgada.
- **Tallo:** Tiene un tallo cilíndrico, erguido con vellosidades glabras simples o ramificadas.
- **Hojas:** Las hojas son oblongas y alternas, con hojas inferiores que son pecioladas o lobuladas y tienen un margen desigual. Tienen de 4 a 20 cm de largo y 1,8 a 8 cm de ancho. Las hojas superiores son amplexicaules que están rodeados por el tallo y tienen un borde entero. Tienen hasta 6 cm de largo y 1,3 cm de ancho. No tienen pecíolos.
- **Flores:** Tienen inflorescencias en forma de racimo que varían en tamaño de 10 a 30 cm. Son amarillas, con 4 sépalos verdes de 4 mm, cuatro pétalos y seis estambres.
- **Fruto y semilla:** Pedicelos 1-2.5 cm, silícula extendida, lineal, cilíndrica, dehiscente, 2-6 cm de largo, ápice con un pico de 1-3 cm de largo.
- **Semillas:** Globulares, de 1.5-2 mm en diámetro, café o negras (Rzedowski & Calderon, 2010).

2.2.10. EL SUELO

Hernández, (2011) señala que el suelo es la capa externa de la corteza terrestre, que se forma a través de un prolongado proceso de meteorización, y actúa como el entorno natural para el desarrollo de las plantas terrestres, ya que les proporciona los nutrientes necesarios y funciona como el sustrato en el que crecen.

No se trata de un componente inerte y desprovisto de vida; por el contrario, la vida del suelo es altamente diversa, compuesta por

microorganismos y macroorganismos, además de las plantas y sus sistemas radiculares.

Mientras que Navarro, (2003) describe el suelo como un sistema abierto y dinámico, compuesto por tres fases (sólida, líquida y gaseosa), en el que se pueden identificar 4 elementos: material orgánico, material inorgánico, agua y aire. Estos elementos están estrechamente interrelacionados y mezclados, creando un área propicia para el crecimiento de las plantas.

Para Mengel y Konrad (1987), consideran que la etapa sólida actúa como el reservorio relevante de nutrientes, donde las partículas inorgánicas contienen nutrientes catiónicos como K, Na, Ca, Mg, Mn, Zn y Cu, mientras que las partículas orgánicas representan lo relevante depósito de N, y en menor medida, de P y S. En la fase líquida, la solución del suelo es responsable del transporte de nutrientes, dirigiéndolos desde diversas capas del suelo hacia las raíces, en su modo iónica, aunque también disuelve O₂ y CO₂.

Casas, (2012) señala en la etapa gaseoso del suelo participa en el intercambio de gases entre los organismos vivos del suelo (raíces de plantas, hongos, bacterias y animales) y la atmósfera. Este intercambio permite el suministro de O₂ a estos organismos y la eliminación de CO₂ producido por la respiración en el suelo. Es importante destacar la sólida conexión de los nutrientes en las etapas líquida, sólida y gaseosa, concluidas por la transformación, a lo largo del tiempo, de un material geológico (roca madre) bajo la influencia de diversos procesos físicos, químicos y biológicos. El suelo está formado por partículas minerales, materia orgánica, agua y aire en proporciones variables.

El suelo es un ente natural complejo, polifásico y polidinámico; por lo tanto, puede ser conceptualizado desde múltiples enfoques, según García (2013).

No hay una definición única de suelo, y a medida que se descubren nuevas perspectivas, se amplía nuestra comprensión de la riqueza inherente al mundo de los suelos. Según la Agencia Europea de Medio Ambiente (2004), el suelo es un sistema natural, organizado e independiente, cuya formación resulta de la interacción del clima, los

organismos, la vegetación, el relieve y el tiempo sobre la roca madre. Constituye una matriz de componentes orgánicos y minerales que forma una red porosa mediante de lo cual circulan líquidos y gases, albergando numerosas poblaciones de organismos vivos en un estado de equilibrio dinámico. Porta (2003) menciona que el suelo desempeña diversas funciones relacionadas con aspectos ecológicos, técnicos, industriales, socioeconómicos y culturales. Entre las más destacadas se encuentran las siguientes:

- **Función Productiva:** Suministro de nutrientes, aire y agua a las plantas.
- **Función Hidrológica:** Almacenamiento y flujo de agua superficial y subsuperficial.
- **Función Medioambiental:** Filtrar, amortiguar, degradar, inmovilizar y reducir la toxicidad de compuestos orgánicos e inorgánicos.
- **Función Biológica:** Hábitat de diferentes organismos.
- **Función Biogeoquímica:** Almacenar y posibilitar el ciclo biogeoquímico de nutrientes.

García (2013) indica que el suelo es un recurso natural no renovable, al menos en términos de tiempo humano. Por lo tanto, tenemos la responsabilidad de preservarlo y conservarlo para las generaciones actuales y futuras. Esto requiere adaptarlo a diferentes usos (como la agricultura, los bosques, el suelo urbano, la industria, etc.), siempre buscando un manejo sostenible de este recurso natural, de manera ordenada y controlada, y asegurando su calidad.

De acuerdo con la naturaleza de sus elementos, cada tipo de suelo, dependiendo de los contenidos relativos de estos y de cómo se agregan a sus partículas sólidas, exhibe propiedades físicas, químicas y biológicas específicas (Casas, 2012).

2.2.10.1. DEGRADACIÓN DEL SUELO

Desde una perspectiva funcional, el suelo desempeña un papel fundamental en cuatro ámbitos clave. En primer lugar, sostiene la producción de biomasa y biodiversidad, garantizando el desarrollo y la conservación de recursos genéticos esenciales para la vida. En segundo lugar, actúa como regulador para garantizar un buen aire y agua, filtrando, amortiguando y desintoxicando compuestos dañinos y equilibrando los ciclos geoquímicos. Además, sirve como un archivo histórico, preservando registros arqueológicos, geológicos y astronómicos. Finalmente, proporciona la base para estructuras socioeconómicas y culturales, desde urbanizaciones hasta trabajos de ingeniería (Lal, 1998).

La degradación del suelo es un fenómeno estrechamente vinculado a las actividades humanas, que reduce su capacidad actual y futura de cumplir con sus funciones esenciales. Este problema, impulsado principalmente por la agricultura y las actividades industriales, tiene consecuencias graves para el medio ambiente. Por ejemplo, prácticas agrícolas intensivas como el uso de agroquímicos, maquinaria pesada y sistemas de riego, así como la introducción de nuevas variedades, generan residuos orgánicos e inorgánicos que el suelo a menudo no puede procesar, lo que agrava su deterioro (Porta, 2003).

Blum (1998) existen seis usos principales del suelo que ilustran su relevancia y su relación con la degradación:

- **Producción de biomasa:** El suelo asegura la provisión de alimentos, forrajes, fibras y otras materias primas, fundamentales para la supervivencia de seres humanos y animales.
- **Función de filtro y amortiguador:** Actúa como intermediario y transformador de compuestos perjudiciales entre la atmósfera, las aguas subterráneas y las raíces de las plantas.
- **Hábitat biológico:** Constituye un hogar para innumerables organismos, lo que lo convierte en una reserva genética indispensable para la biodiversidad.

- **Base para infraestructuras humanas:** Soporta desarrollos urbanos, industriales, carreteras, aeropuertos y otras construcciones.
- **Fuente de recursos naturales:** Almacena energía geogénica, materias primas como arenas y gravas, y reservas de agua
- **Herencia geogénica y cultural:** Forma parte integral del paisaje y guarda tesoros paleontológicos y arqueológicos que ayudan a entender el concepto del planeta y de la humanidad.

2.2.11. METALES PESADOS

Se consideran metales pesados a aquellos elementos químicos con una densidad superior a 5 g/cm³ o con un número atómico mayor a 20, excluyendo a los metales alcalinos y alcalinotérreos. Sin embargo, este término suele emplearse comúnmente con una connotación negativa, ya que está asociado al riesgo de toxicidad que puede generar su presencia en el suelo cuando supera ciertos niveles críticos (López y Grau, 2005).

En función de su concentración habitual en la materia seca viva, los elementos metálicos y no metálicos se clasifican en dos grupos: macroelementos y microelementos. Los macroelementos son aquellos cuyo contenido es mayor al 0,01%, mientras que los microelementos tienen una presencia inferior a ese porcentaje. Algunos microelementos, aunque requeridos en cantidades mínimas o trazas, son indispensables para los procesos biológicos. Entre los oligoelementos esenciales para las plantas se encuentran el boro (B), cobre (Cu), cobalto (Co), hierro (Fe), manganeso (Mn), molibdeno (Mo), níquel (Ni) y zinc (Zn), fundamentales para completar su ciclo vital (Ginocchio y Baker, 2004).

Cuando los metales pesados alcanzan concentraciones entre 0,001 y 0,1 mg/kg, y superan un umbral específico, pueden resultar tóxicos. (García y Dorronsoro, 2005).

Algunos metales pesados, que son el cadmio (Cd), el mercurio (Hg) y el plomo (Pb), no tienen una función biológica conocida y, cuando se acumulan en ciertas cantidades dentro de los organismos vivos, pueden

causar graves disfunciones en su funcionamiento. El término "metal pesado" está relacionado con las categorías de elementos traza, macroelementos y oligoelementos, ya que varios de estos también pueden clasificarse como metales pesados. Ahora bien, no todos los elementos trazan son metales, como ocurre con el arsénico (As), que es un ejemplo destacado (Gratao, Polle, Lea y Azevedo, 2005).

• **Indicadores Biológicos:** Los indicadores biológicos son herramientas fundamentales para analizar la calidad del suelo, ya que integran una amplia variedad de factores relacionados con la actividad biológica. Entre estos se incluyen la abundancia y los subproductos de microorganismos como bacterias y hongos, así como de macroorganismos como nemátodos, lombrices, anélidos y artrópodos. También abarcan procesos como las tasas de respiración, la presencia de ergosterol y otros subproductos fúngicos, la descomposición de residuos vegetales, y el contenido de nitrógeno (N) y carbono (C) en la biomasa microbiana (Bautista y Gutiérrez, 2004).

2.2.11.1. CLASIFICACIÓN DE LOS METALES PESADOS

Desde una perspectiva biológica, los elementos químicos pueden clasificarse en dos grandes categorías (Dorransoro, 2015).

a) Elementos esenciales

Estos elementos juegan un papel crucial en diversos procesos metabólicos y en la síntesis de proteínas, siendo necesarios en cantidades pequeñas o incluso ínfimas. Sin embargo, cuando sus concentraciones superan un determinado umbral —que varía según el metal— pueden volverse tóxicos. Entre estos elementos se observa el cobre (Cu), zinc (Zn), níquel (Ni), cobalto (Co) y cromo (Cr) (ver Tabla 4).

Tabla 4*Principales funciones de los micronutrientes*

Elemento	Función
Cu	Importante papel estructural y funcional
Zn	Constituyente de enzimas proteínas y en la regulación genética
Ni	Vital para el combate de algunas enfermedades
Co	Necesario para la fijación de nitrógeno
Cr	Interviene en el control del azúcar en sangre

Nota: Dorronsoro (2015).

b) Elementos no esenciales

El segundo grupo lo conforman los metales que no tienen una función biológica conocida. Su ausencia no genera deficiencias en los organismos, pero su acumulación en altas concentraciones puede ser extremadamente tóxica. El umbral a partir del cual estos elementos se vuelven dañinos es mucho más bajo que en el caso de los elementos esenciales. Entre ellos destacan el plomo (Pb) y el cadmio (Cd).

2.2.11.2. CONTAMINACIÓN DE LOS SUELOS POR METALES PESADOS

En el suelo, algunos elementos minoritarios están presentes en concentraciones muy bajas. A medida que la vida ha evolucionado para adaptarse a estas cantidades mínimas, las altas concentraciones de estos elementos se han vuelto tóxicas para los organismos vivos. Entre los elementos más abundantes en este grupo se encuentran mencionados como metales pesados (García y Dorronsoro, 2002).

Un metal pesado se define como un elemento cuya densidad es igual o superior a 5 g/cm³ en su forma elemental, o cuyo número atómico excede 20, excluyendo los metales alcalinos y alcalinotérreos. Estos elementos representan menos del 0,1% de la corteza terrestre, y habitualmente su proporción es incluso menor al 0,01%. Además, hay otros elementos químicos, como el arsénico

(As), el boro (B) y el selenio (Se), que, aunque no son metales pesados, suelen agruparse con ellos debido a sus comportamientos y orígenes similares (Volke y Velasco, 2016).

a) Contaminación difusa

Se produce cuando las fuentes contaminantes tienen un área de acción amplia y difícil de precisar. Este tipo de contaminación incluye la deposición atmosférica de actividades urbano-industriales, los sedimentos fluviales contaminados y las prácticas agrícolas y ganaderas. Aunque la cantidad de contaminantes por unidad de superficie es menor que en la contaminación puntual, su extensión y magnitud suelen ser mayores (Volke y Velasco, 2016).

b) Contaminación puntual

En este caso, las fuentes contaminantes están localizadas en un área específica.

Estas pueden clasificarse en fuentes estacionarias y móviles. Entre las estacionarias se encuentran las actividades urbano-industriales y mineras, que generan residuos sólidos, efluentes líquidos y emisiones gaseosas. Si estos residuos no son tratados adecuadamente, se pueden incorporar sustancias nocivas al suelo en las proximidades del foco emisor (Volke y Velasco, 2016).

2.2.11.3. EFECTO DE LOS METALES PESADOS EN LOS SERES VIVOS

Los metales pesados pueden tener efectos devastadores en los seres vivos, especialmente al concentrarse progresivamente en la cadena alimenticia. Estos elementos pueden generar problemas de salud graves, como enfermedades cancerígenas o mutagénicas, aunque todavía se sabe poco sobre los efectos crónicos de su consumo en mínima parte durante largos periodos (Birley y Lock, 1999).

La toxicidad de los metales pesados se debe, en parte, a su capacidad para unirse al conjunto de sulfhídricos de las proteínas,

disminuyendo su actividad, alterando su estructura o desplazando elementos esenciales, lo que provoca deficiencias. Además, su acumulación genera la formación de radicales libres y especies reactivas de oxígeno, lo que genera estrés oxidativo (Hall, 2002).

a) Plomo (Pb)

El plomo afecta negativamente a los microorganismos al ralentizar la descomposición heterótrofa de la materia orgánica. Aunque se dispone de poca información sobre su toxicidad en las plantas, se sabe que este metal tiende a acumularse en las raíces. En el caso de los animales, el plomo puede ser absorbido principalmente por inhalación o ingestión, y en menor medida, el tetraetilo de plomo puede atravesar la piel intacta, aunque de manera muy lenta.

Sin embargo, el proceso de excreción es aún más lento, lo que provoca una acumulación progresiva de este elemento en los organismos (John, 1983).

En los seres humanos, el plomo no desempeña ninguna función biológica esencial y su exposición, ya sea a través de alimentos, agua o aire contaminados, puede generar graves efectos adversos. Estos incluyen alteraciones en la producción de hemoglobina, causando la anemia, la subida de la presión arterial, daños renales, interrupciones del embarazo, alteraciones en el sistema nervioso y el cerebro, así como una disminución de la fertilidad masculina debido al deterioro del espermatozoides. En los niños, la exposición al plomo puede reducir sus capacidades de aprendizaje, generar problemas de comportamiento como agresividad, impulsividad e hipersensibilidad, y, en casos graves, causar daño al sistema nervioso central, con efectos particularmente severos en los menores (Lenntech, 2017).

b) Plata (Ag)

La plata pura es un metal brillante, dúctil, resistente y maleable, caracterizado por poseer el color blanco más reflectante entre todos los metales, además de la mayor conductividad térmica y eléctrica. Presenta un brillo metálico blanco que puede ser pulido con facilidad. Desde una perspectiva química, pertenece al grupo de los metales pesados y nobles, mientras que, en el ámbito comercial, es considerado un metal precioso.

En la naturaleza, la plata es un elemento poco abundante, representando aproximadamente una parte por cada 10 000 000 en la corteza terrestre.

Aunque puede encontrarse en estado nativo, generalmente está presente en minerales que contienen compuestos de plata, asociados comúnmente con elementos como el azufre (en la argentita, Ag_2S), el arsénico (proustita, Ag_3AsS_3), el antimonio (pirargirita, Ag_3SbS_3) o el cloro (plata córnea, AgCl). Su forma principal corresponde a sulfuros y sulfosales. La mayor parte de la plata extraída, cerca de 3/4 partes de su producción, se obtiene como subproducto de la extracción de otros metales, principalmente cobre y plomo. Existen numerosos minerales que contienen plata, como se indica en el análisis de Smolders (2013). En relación con los suelos, la plata también puede presentar una toxicidad significativa, dependiendo de su estado químico. Se observó que las nanopartículas se encuentran activas en el suelo y disminuyen notablemente los indicadores de actividad enzimática. (Remtavares, 2010).

c) Zinc (Zn)

El zinc es un metal de transición que presenta las siguientes propiedades: pertenece al período 4 y grupo IIB, tiene un número atómico de 30, una masa atómica de 65.4, una densidad de 7.14 g/cm^3 , un punto de fusión de 419.5 °C y un punto de ebullición de 906 °C. Este elemento está naturalmente presente en el suelo, con una concentración promedio de aproximadamente 70 mg/kg en las

rocas de la corteza terrestre. Sin embargo, sus niveles han incrementado significativamente debido a actividades humanas. Las principales fuentes de este aumento incluyen procesos industriales como la minería, la combustión de carbón y desechos, y el procesamiento del acero.

Muchos alimentos contienen zinc en diferentes concentraciones, y el agua potable también puede contener este elemento, especialmente cuando se almacena en tanques metálicos. No obstante, fuentes industriales y sitios con desechos tóxicos pueden elevar las concentraciones de zinc en el agua potable a niveles perjudiciales para la salud humana. Aunque el zinc es un oligoelemento esencial, cuya deficiencia puede ocasionar malformaciones congénitas, su acumulación excesiva en el medio ambiente es motivo de preocupación.

El aumento global en la producción de zinc ha generado una mayor contaminación, especialmente en cuerpos de agua, debido a los residuos industriales. Esto ha provocado su acumulación en los sedimentos de los ríos y un aumento en la acidez del agua. Algunos peces que habitan en aguas contaminadas pueden acumular zinc en sus organismos, y este metal puede biomagnificarse a lo largo de la cadena alimentaria.

En los suelos, el zinc soluble puede contaminar las aguas subterráneas y acumularse a niveles que las plantas no pueden manejar, afectando su desarrollo. Además, este metal tiene un impacto negativo en la actividad microbiana y en organismos como las lombrices de tierra, lo que ralentiza la descomposición de la materia orgánica (Wuana et al., 2011)

2.2.11.4. DENOMINACIÓN DEL SUELO SEGÚN EL PH

Tabla 5

Denominación del suelo según el pH

pH	Categoría
3 – 4.5	Suelos extremadamente ácidos
4.5 – 5	Suelos fuertemente ácidos
5 – 5.5	Suelos muy ácidos
6 – 6.75	Suelos débilmente ácidos
6.75 – 7.25	Suelos neutros
7.25 – 8.5	Suelos básicos o alcalinos
> 8.5	Suelos muy alcalinos

Nota: García et al. (2004).

2.2.11.5. CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA DEL SUELO (CE)

Según él, es la cantidad de conductividad eléctrica (CE) que típicamente posee el suelo, pero en el caso de la conductividad eléctrica del suelo (CE), es una medida de la cantidad de sales disueltas en la solución del suelo (Machado, 2009).

Tabla 6

Conductividad eléctrica y clases de salinidad para una suspensión de suelo

Conductividad eléctrica (ds/m)	Clase de salinidad
0 – 0.98	No salino
0.98 – 1.71	Muy ligeramente salino
1.71 – 3.16	Ligeramente salino
3,16 – 6.07	Moderadamente salino
> 6.07	Fuertemente salino

Nota: Adaptado de: Soil Survey Staff (1993), Janzen (1993) y Smith y Doran (1996)

2.3. DEFINICIONES CONCEPTUALES

- **Relave:** Los residuos generados por el procesamiento de minerales en la minería presentan características físicas y químicas adversas que dificultan el desarrollo de plantas y microorganismos. Esto se debe a su granulometría fina, la falta de materia orgánica y macronutrientes, así como a las altas concentraciones de metales y metaloides presentes en estos desechos (Córdova, 2010).
- **Eficacia:** Se refiere a la aplicación juiciosa de métodos para lograr un objetivo predefinido, es decir, completar un objetivo con la menor cantidad de tiempo y recursos posibles. (Pérez, 2009).
- **Metales:** Se describe de la siguiente manera: Elementos naturales de alto peso molecular que son típicamente extremadamente prácticos y empleados para una variedad de propósitos; sin embargo, cuando se trata de contaminación, los metales pesados tienen efectos negativos sobre la salud y dañan numerosos órganos (Eróstegui, 2009).
- **pH:** El pH es muy significativo para diferentes campos, especialmente en la ciencia del suelo, ya que aporta información significativa. Una característica destacada es que las plantas logran almacenar minerales diluidos en agua, por lo que el pH contribuye a modificar el nivel de solubilidad de los minerales (Ibáñez y Moreno 2010).

2.4. HIPÓTESIS

2.4.1. HIPÓTESIS GENERAL

H_i: Resultará eficaz la fitoextracción de metales pesados (plomo, zinc y plata) en suelos contaminados, utilizando las especies de nombres *Lupinus tomentosus* (Chocho silvestre) y *Brassica rapa* (Nabo silvestre).

H_o: No resultará eficaz la fitoextracción de metales pesados (plomo, zinc y plata) en suelos contaminados, utilizando las especies de nombres *Lupinus tomentosus* (Chocho silvestre) y *Brassica rapa* (Nabo silvestre).

2.4.2. HIPÓTESIS SECUNDARIOS

H_i: Resultará eficaz la fitoextracción de metales pesados (plomo, zinc y plata) en suelos contaminados, utilizando la especie de nombre *Lupinus tomentosus* (Chocho silvestre).

H_o: No resultará eficaz la fitoextracción de metales pesados (plomo, zinc y plata) en suelos contaminados, utilizando la especie de nombre *Lupinus tomentosus* (Chocho silvestre).

H_i: Resultará eficaz la fitoextracción de metales pesados (plomo, zinc y plata) en suelos contaminados, utilizando la especie de nombre *Brassica rapa* (Nabo silvestre).

H_o: No resultará eficaz la fitoextracción de metales pesados (plomo, zinc y plata) en suelos contaminados, utilizando la especie de nombre *Brassica rapa* (Nabo silvestre).

H_i: Resultará eficaz la fitoextracción de metales pesados (plomo, zinc y plata) en suelos contaminados, utilizando dos especies de nombres, *Lupinus tomentosus* (Chocho silvestre) y *Brassica rapa* (Nabo silvestre).

H_o: No resultará eficaz la fitoextracción de metales pesados (plomo, zinc y plata) en suelos contaminados, utilizando dos especies de nombres, *Lupinus tomentosus* (Chocho silvestre) y *Brassica rapa* (Nabo silvestre).

2.5. VARIABLE ORDINAL

2.5.1. VARIABLE EVALUATIVA

- Suelo contaminado por metales pesados

2.5.2. VARIABLE DE CALIBRACIÓN

- Fitoextracción

2.6. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

Tabla 7

Eficacia de la fitoextracción de metales pesados en suelos contaminados, utilizando las especies de lupinus tomentosus y brassica rapa

Variable ordinal	Definición conceptual	Dimensiones	Indicadores	Escala de medición
Variable independiente (Calibración): Fitoextracción	Es la extracción y/o estabilización de los metales pesados de suelos contaminados, a través de especies vegetativas idóneas resistentes a sustratos de poco nutrientes, donde lo tienen almacenados en sus tejidos, raíces, rizomas, hojas, etc.	X1: Área afectada	• Altura inicial del Lupinus tomentosus y Brassica rapa • Altura final del Lupinus tomentosus y Brassica rapa. • Metales pesados (plomo, zinc y plata) en las raíces • Conductividad inicial del suelo • Conductividad final del suelo	• cm • cm • pmm
Variable dependiente (evaluativa): Suelo contaminado por metales pesados	Un suelo contaminado por residuos y/o relaves de metales pesados, está relacionado mayormente por las actividades mineras de extracción de metales.	Y1: Propiedades químicas Y2: Características del suelo	• pH inicial • pH final • Concentración de metales inicial en el suelo • Concentración de metales final en el suelo	• dS/cm • dS/cm • 0-14 • 0-14 • mg/Kg • mg/Kg

Nota: La tabla presenta la operacionalización de variables del estudio.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN

Según la planificación de las mediciones: es de tipo prospectivo porque la investigación se trabajó con datos primarios, lo cual indica tener menos error porque es planificado, los datos se recolectaron dentro de los experimentos.

De acuerdo al número de mediciones de las variables de estudio: es de tipo longitudinal, ya que en el proyecto se inició con una medición inicial, luego con la intervención experimental de las plantas, se volvió a medir, siendo la medición final, observando cuan eficaz ha sido la fitoextracción mediante las plantas.

De acuerdo al número de variables de análisis, es de tipo analítico porque el enunciado del proyecto contiene dos variables, realizándose el experimento.

De acuerdo a la intervención del investigador: fue con intervención, puesto que se intervino para la mejoría de la calidad del suelo mediante dos plantas, no solo se midió y observó, también se analizó la mejoría de la calidad del suelo (Supo y Zacarias, 2020).

3.1.1. ENFOQUE

el enfoque de investigación fue cuantitativo en su naturaleza porque presentaba un problema específico y concreto del cual se recopilaron datos numéricos sobre el fenómeno. Se utilizaron programas estadísticos para estudiar y analizar los datos a través de procesos con el fin de probar teorías y establecer patrones de comportamiento. (Supo y Zacarías, 2020).

3.1.2. ALCANCE O NIVEL

La actividad de estudio tuvo un alcance aplicativo, la investigación fue con intervención bajo experimentos. Por otro lado, se determinó la solución del problema acerca de la mejora en la descontaminación del

suelo, observando que planta es más eficaz, prediciendo el pronóstico y determinando la mejora del suelo (Supo y Zacarias, 2020).

3.1.3. DISEÑO

El prototipo de trabajo de investigación fue de experimento verdadero, donde se intervino mediante tres grupos, la fitoextracción con *Lupinus tomentosus*, *Brassica rapa L.* y *Lupinus tomentosus* + *Brassica rapa L.*; donde se observó la eficacia entre los tres grupos (Supo y Zacarías, 2020).

GE1: O1 — X1 — O2

GE2: O1 — X2 — O2

GE3: O1 — X3 — O2

Donde:

- **GE1:** Fitoextracción usando *Lupinus tomentosus* (**X1**).
- **GE2:** Fitoextracción usando *Brassica rapa* (**X2**).
- **GE3:** Fitoextracción usando *Lupinus tomentosus* + *Brassica rapa* (**X3**).
- **O1:** Medición inicial.
- **O2:** Medición final.

3.1.4. MODELO

$$y_{ik} = \mu + t_i \epsilon_i$$

Donde:

- y_{ik} = Observación del experimento.
- μ = Media poblacional.
- t_i = Efecto del i-ésimo tratamiento.
- ϵ_i = Error experimental.
- i = Cualquier tratamiento.

3.2. POBLACIÓN Y MUESTRA

3.2.1. POBLACIÓN

La población de estudio fue la cantidad de suelo contaminado de la mina abandonada Carlu chino del centro poblado de Machcan que tiene un área total de 1000 m², Se encuentra en el Distr. de San Francisco de Asís de Yarusyacan del Dpto. de Pasco.

3.2.2. MUESTRA

Se obtuvo por el método del muestreo aleatorio simple, ya que se realizó de una forma sencilla en seleccionar las muestras representativas, en el que se consistió en tomar 75 muestras de 2 kg cada uno (25 para cada tratamiento), se colocaron en envases específicos para el estudio.

3.3. TÉCNICAS E INSTRUMENTO DE RECOLECCIÓN DE DATOS

Tabla 8

Técnicas e instrumento de recolección de datos

Variable	Indicador	Técnica	Instrumento/recurso
Fitoextracción	Altura inicial de <i>Lupinus tomentosus</i> y <i>Brassica rapa</i>	Observación	Flexómetro
	Altura final de <i>Lupinus tomentosus</i> y <i>Brassica rapa</i>	Observación	Flexómetro
	Concentración de metales pesados en las raíces	Observación	Laboratorio
Suelo contaminado por metales pesados	Conductividad eléctrica inicial del suelo	Observación	Laboratorio
	Conductividad eléctrica final del suelo	Observación	Laboratorio
	pH inicial	Observación	Laboratorio

pH final	Laboratorio	Laboratorio
Concentración de metales inicial en el suelo	Observación	Laboratorio
Concentración de metales final en el suelo	Observación	Laboratorio

Nota: Protocolo nacional para el monitoreo para el estándar de calidad ambiental (ECA) para suelo, (Decreto Supremo N.º002-2013-MINAM).

3.3.1. PARA LA RECOLECCIÓN DE DATOS

Se realizó de la siguiente manera teniendo como referencia la Guía de muestreo de suelos, aprobados con “Resolución Ministerial N.º085-2014-MINAM y el D. S. N.º002-2013 MINAM.

a) En materiales y equipos

Se utilizó utensilios de plástico para el muestreo. En herramientas se utilizó pala recta y curva, pico, y barretas. Para el marcaje se utilizó etiquetas plastificadas con marcadores resistentes a los climas húmedos. Así mismo para la medición se utilizó el flexómetro. Con la ayuda del equipo del celular se tomó fotografías áreas del área para planificar y determinar los puntos para la extracción de muestras.

b) Procedimiento

- Se delimitó el terreno de muestreo, utilizando un croquis e imágenes fotográficas.
- Para muestras de experimento se determinó áreas de 20 por 20 cm y a profundidades de 24 a 30. Recorriendo y señalando los puntos de muestreo, utilizando una lampa para hacer huecos en forma de V y el cuchillo para delimitar las dimensiones del área.
- La determinación del lugar y de forma al azar se realizó la toma de muestras, extrayendo 20 muestra patrones y 75 submuestras de 2 kg cada uno, en una población de tamaño de área de 1000 m².
- Al final del recorrido, las muestras fueron homogeneizadas dentro de un balde.

- Se transfirió 75 porciones de muestra a bolsas de 2 kg cada uno. Identificándose cada una de las muestras de acuerdo con el campo de tratamiento al que pertenece.

c) Materiales para guardar y transportar muestras

Para este proceso se utilizó baldes de plástico, resistentes a los factores climáticos, cambios químicos en su composición, y su almacenamiento.

d) Etiquetado

Se colocó en un lugar destacado, se mantuvo dentro de las dimensiones del contenedor y se sujetó firmemente para evitar su pérdida. con el mínimo de los siguientes datos: número, lugar de muestreo, fecha y hora de muestreo, nombre del proyecto y nombre del recolector de muestras.

e) Ficha de muestreo

Se utilizó dos formatos de ficha de muestreo, una para levantar datos de crecimiento longitudinal de las especies vegetativas y otro formato generado por los laboratorios, respecto a los resultados en el análisis de suelos.

f) Condiciones de seguridad de las muestras

Se tuvo en cuenta el pretratamiento de las muestras in situ. Se proporcionaron guantes de látex-K, agua desionizada, gafas de seguridad, toallas de papel, mascarillas contra el polvo y franelas para la limpieza y seguridad en la manipulación de las muestras. Se utilizaron bolígrafos, cinta adhesiva, rotuladores indelebles y etiquetas adhesivas.

3.3.2. PARA LA PRESENTACIÓN DE DATOS

Se consideran las tablas, los gráficos y los resultados del análisis estadístico, y la narrativa de la obra escrita se tiene en cuenta al interpretar los resultados. Se debatirán estos resultados y se llegará a una conclusión de la investigación.

3.4. TÉCNICAS PARA EL PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

Las informaciones fueron analizadas y procesados utilizando el software estadístico IBM SPSS versión 25, que luego fue utilizado para interpretar los datos en tablas estadísticas y probar las hipótesis usando técnicas estadísticas. El objetivo de este análisis es precisamente explicar los datos en términos de varianza y tendencia central.

Para el estudio en cuestión, se utilizó el diseño experimental cuantitativo, de modo que se recolectaron y analizaron datos numéricos para entender las relaciones entre las variables.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

4.1. PROCEDIMIENTO DE DATOS

Tabla 9

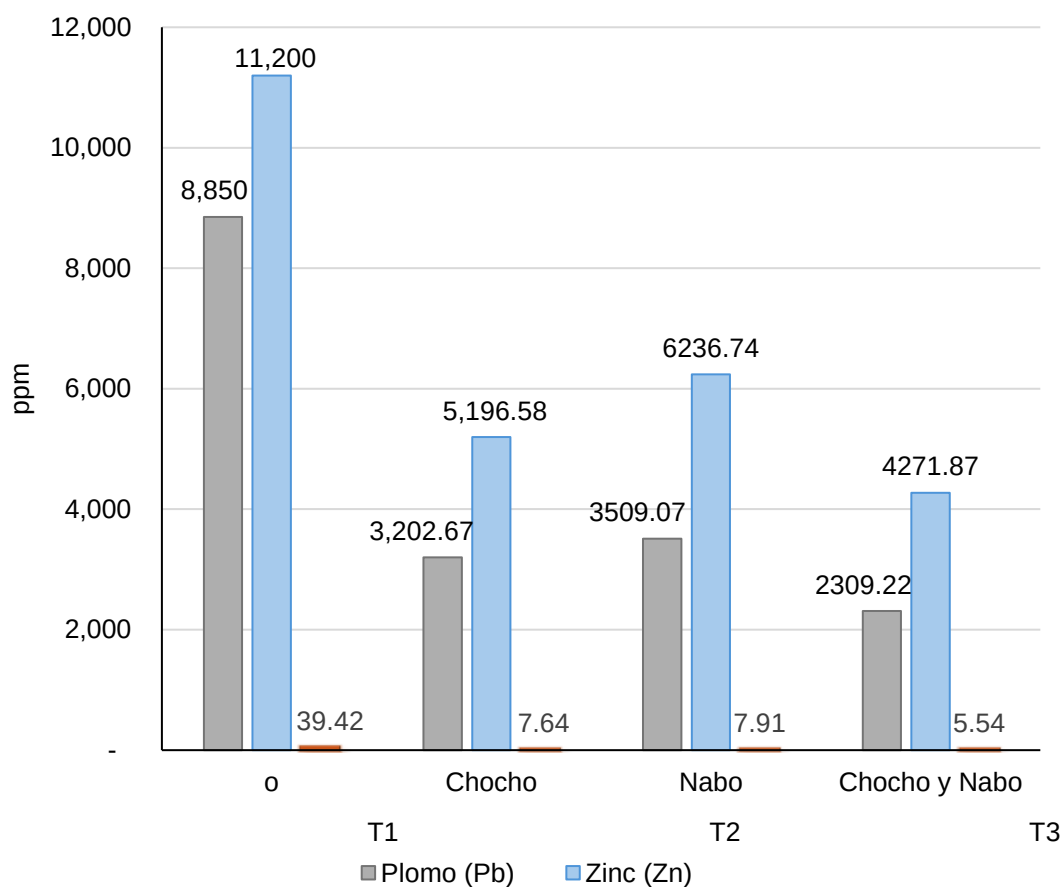
Eficacia de la fitoextracción del lupinus tomentosus (chocho silvestre) y la brassica rapa (nabo silvestre) de metales pesados (plomo, zinc y plata) en suelos contaminados

	Antes		Después	
	T1		T2	T3
	0	Chocho	Nabo	Chocho y Nabo
	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)
Plomo (Pb)	8850	3202.67	3509.07	2309.22
Zinc (Zn)	11200	5196.58	6236.74	4271.87
Plata (Ag)	39.42	7.64	7.91	5.54

Nota: En la tabla que antecede, en comparación del antes (sin intervención) y después (con intervención) en unidades de partes por millón (ppm), se observa la eficacia de fitoextracción de metales pesados en áreas contaminados, donde el tercer tratamiento (T3) de las especies vegetativas Chocho y Nabo silvestre ocupa el primer lugar con 2309.22 ppm, 4271.84 ppm y 5.54 ppm, para los minerales plomo, zinc y plata, respectivamente, en segundo lugar, se encuentra el tratamiento uno (T1) de la especie Chocho silvestre, con 3202.67 ppm, 5196.58 ppm y 7.64 ppm, para los minerales plomo, zinc y plata, respectivamente y en último lugar se encuentra el tratamiento dos (T2) (Nabo silvestre), con 3509.07 ppm, 6236.74 ppm y 7.91 ppm, para los minerales de plomo, zinc y plata, respectivamente. Respecto al orden de mayor disposición de fitoextracción en los 3 metales, el metal Plata (Ag) ocupa el primer lugar con 5.54 ppm (85.95 % de disminución), siguiéndole el Plomo (Pb) en segundo lugar con 2309.22 ppm (73.91% de disminución) y por último el metal Zinc (Zn) con 4271.87 ppm (61.86 % de disminución).

Figura 3

Eficacia de la fitoextracción del lupinus tomentosus (chocho silvestre) y brassica rapa (nabo silvestre) de metales pesados (plomo, zinc y plata) en suelos contaminados



Nota: En la figura que antecede, tal como se describe en la nota de la tabla 7, se observa el comportamiento de eficacia en fitoextracción de metales pesados en unidades de medición de partes por millón (ppm), donde el T3 (Chocho y Nabo silvestre) ocupa el primer lugar con 2309.22ppm (73.91% de disminución), 4271.87 ppm (61.86% de disminución) y 5.54 ppm (85.95% de disminución) para los metales plomo, zinc y plata, respectivamente, el segundo lugar es para el T1 (Chocho silvestre), con 3202.67 ppm (63.81% de disminución), 5196.58 ppm (53.6% de disminución) y 7.64 ppm (80.62% de disminución), para los metales de plomo, zinc y plata, respectivamente, y de último tenemos al T2 (Nabo silvestre), con 3509.07 ppm (60.35% de disminución), 6236.74 (44.31% de disminución) y 20.07 (79.93% de disminución).

Tabla 10

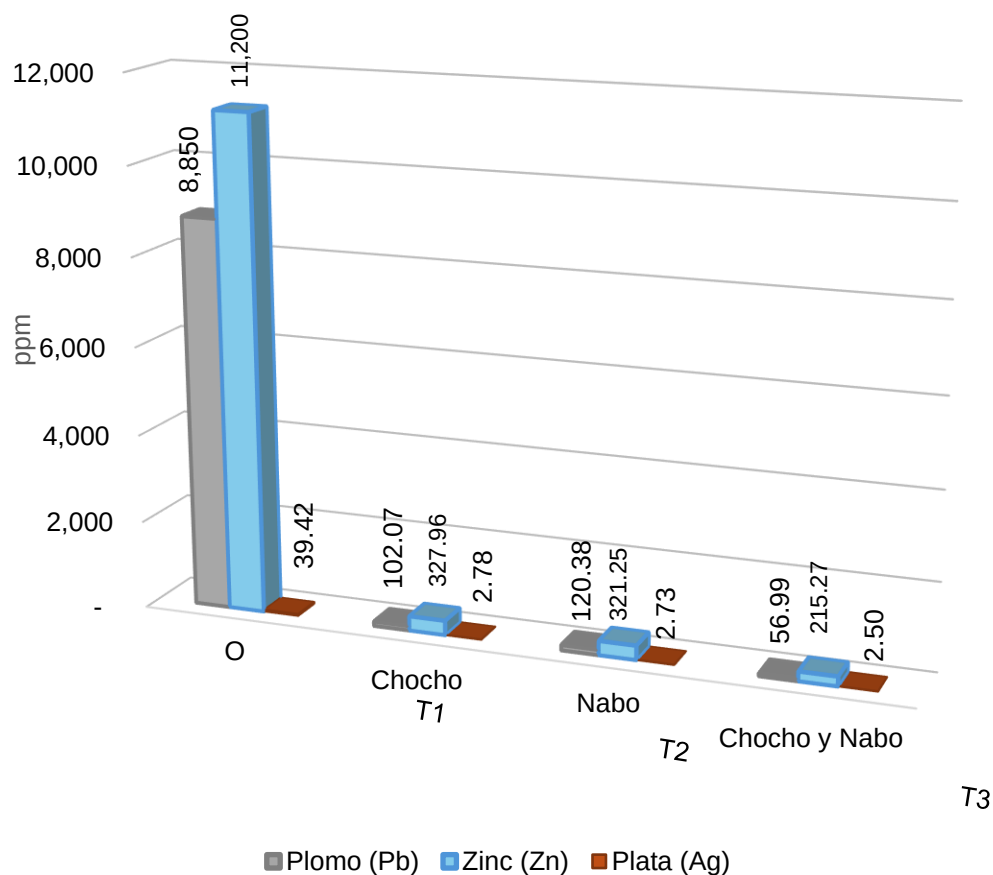
Eficacia del lupinus tomentosus (chocho silvestre) y brassica rapa (nabo silvestre) en la fitoextracción de absorción y acumulación de metales pesados (plomo, zinc y plata) en sus raíces de suelos contaminados

	Antes		Después	
	T1		T2	T3
	0	Chocho	Nabo	Chocho y Nabo
	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)
Plomo (Pb)	8850	102.07	120.38	56.99
Zinc (Zn)	11200	327.96	321.25	215.27
Plata (Ag)	39.42	2.78	2.73	2.50

Nota: En la tabla que antecede, en comparación del antes (sin intervención) y después (con intervención) en unidades de partes por millón (ppm), se observa la eficacia de absorción y acumulación de los metales pesados en las raíces de las especies vegetativas. En ese sentido para el metal Plomo (Pb), el que absorbió más fue el T2 (Nabo silvestre) con 120 ppm (1.36 % de disminución), siguiendo el T1 (Chocho silvestre) con 102.07 ppm (1.15 % de disminución) y por último el T3 (Chocho y Nabo silvestre) con 56.99 ppm (0.64 % de disminución). Así mismo para el metal Zinc (Zn) en primer lugar tenemos al T1 (Chocho silvestre) con 327.96 ppm (2.93 % de disminución), seguido del T2 (Nabo silvestre) con 321.25 ppm (2.87 % de disminución) y tercero el T3 (Chocho y Nabo silvestre) con 215.27 ppm (1.92 % de disminución). Por último, para el metal Plata (Ag), en primer lugar, tenemos al T1 (Chocho silvestre) con 2.78 ppm (7.05 % de disminución) en el segundo lugar el T2 (Nabo silvestre) con 2.73 ppm (6.93 % de disminución) y en tercer lugar tenemos al T3 (Chocho y Nabo silvestre) con 2.50 ppm (6.34 % de disminución).

Figura 4

Eficacia del lupinus tomentosus (chocho silvestre) y brassica rapa (nabo silvestre) en la fitoextracción de absorción y acumulación de metales pesados (plomo, zinc y plata) en sus raíces de suelos contaminados



Nota: En la figura que antecede, complementado lo descrito en la nota de la tabla 10. En el gráfico de barras también podemos observar la eficacia de fitoextracción en absorción y acumulación en las raíces de las especies vegetativas, en ese sentido en las posiciones de los tratamientos tenemos al T1 (Chocho silvestre) para el metal plomo con 102.07 ppm (segundo lugar), zinc con 327.96 ppm (primer lugar) y plata con 2.78 ppm (primer lugar). Así mismo para el T2 (Nabo silvestre) tenemos al plomo con 120.38 ppm (primer lugar), al zinc con 321.25 ppm (segundo lugar) y a la plata con 2.73 ppm (segundo lugar). Por último, tenemos al T3 (Chocho y Nabo silvestre) con 56.99 ppm (tercer lugar) en fitoextracción del plomo, al zinc con 215.27 ppm (tercer lugar) y a la plata con 2.50 ppm (tercer lugar).

Tabla 11

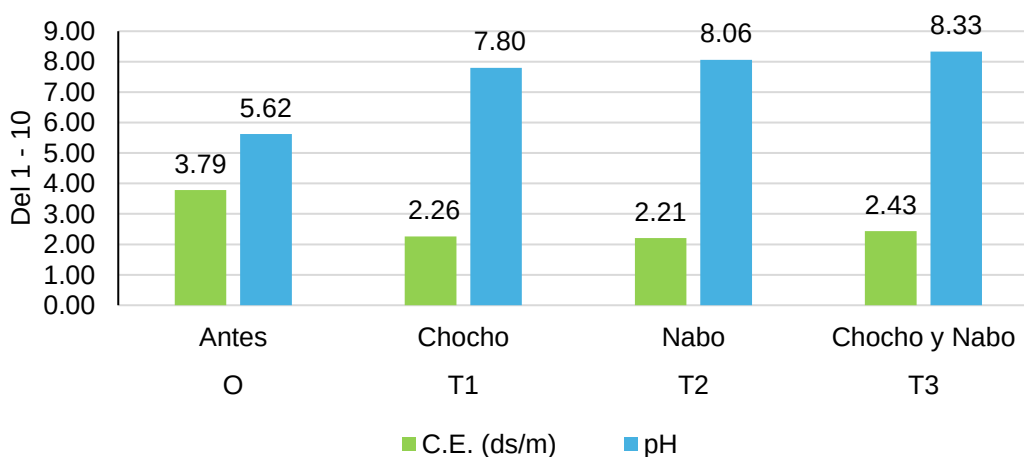
Eficacia de la fitoextracción del lupinus tomentosus (chocho silvestre) y la brassica rapa (nabo silvestre) en la mejora de las propiedades químicas en suelos contaminados

	Antes		Después	
		T1	T2	T3
	0	Chocho	Nabo	Chocho y Nabo
C.E. (ds/m)	3.79	2.26	2.21	2.43
pH	5.62	7.80	8.06	8.33

Nota: En la tabla que antecede, se observa valores promedios de unidades de medidas de las propiedades químicas. En la Conductividad Eléctrica al primer análisis del suelo contaminado sin intervención (antes) se tiene un valor promedio de 3.79 ds/m, en ese sentido los resultados después de la intervención tienen comportamientos descendentes de 2.21, 2.26, 2.43 en unidades de ds/m, para los tratamientos vegetativos del Nabo silvestre (T2), Chocho silvestre (T1) y el T3 (Chocho y Nabo silvestre), respectivamente. En el Potencial de Hidrógeno (pH) al primer análisis del suelo contaminado sin intervención (antes) se tiene un valor promedio de 5.62 pH, y después de la intervención se tiene resultados ascendentes de 7.80, 8.06 y 8.33 de pH en las especies vegetativas de Chocho silvestre (T1), Nabo silvestre (T2) y el T3 (Chocho y Nabo silvestre), respectivamente.

Figura 5

Eficacia de la fitoextracción del lupinus tomentosus (chocho silvestre) y la brassica rapa (nabo silvestre) en la mejora de las propiedades químicas en suelos contaminados



Nota: En la figura que antecede, tal como se describe en la nota de la Tabla 9. Del gráfico de barras de la conductividad eléctrica en comparación con el primer análisis del suelo sin intervención (3.79 ds/m) se observa el comportamiento descendente positivo de 2.26, 2.21, 2.43 en ds/m, para los tratamientos T1 (Chocho silvestre), T2 (Nabo silvestre) y T3 (Chocho y Nabo silvestre), respectivamente. Así mismo para la propiedad química del potencial de hidrógeno (pH) sin intervención (0) tuvo un valor de 5.62 pH y con intervención tienen resultados positivos de 2.26, 2.21 y 2.43 de pH, para los tratamientos T1 (Chocho silvestre), T2 (Nabo silvestre) y T3 (Chocho y Nabo silvestre), respectivamente.

Tabla 12

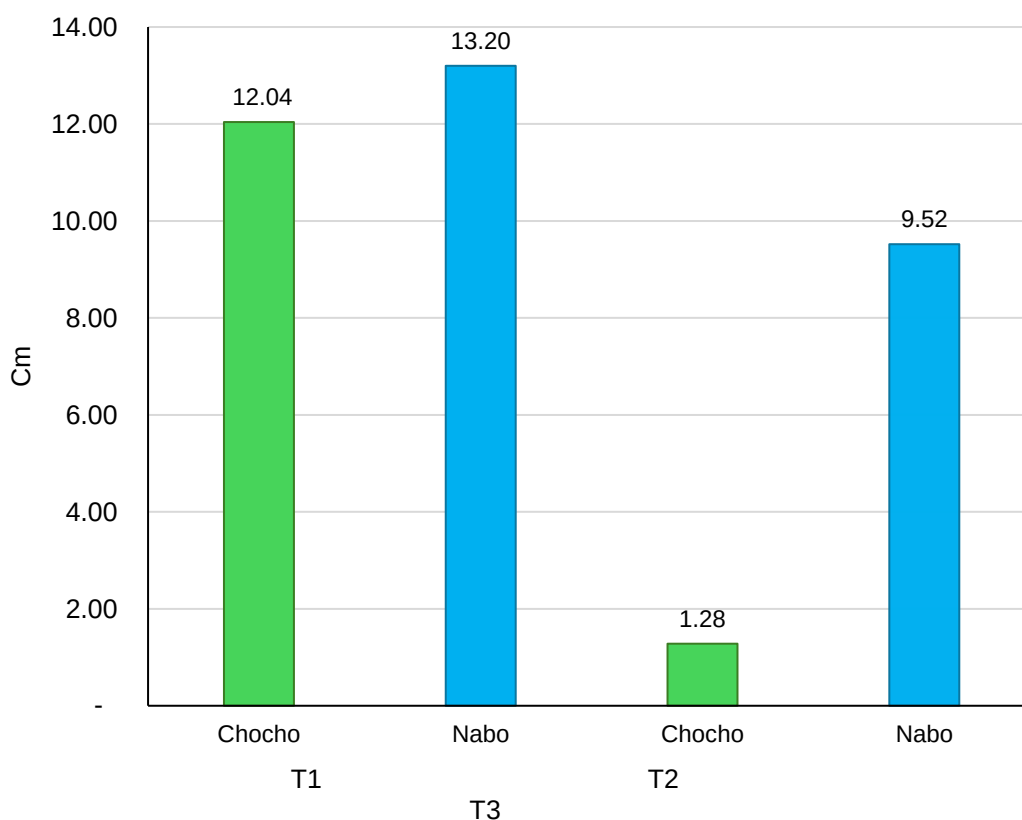
Crecimiento longitudinal del lupinus tomentosus (chocho silvestre) y la brassica rapa (nabo silvestre) en suelos contaminados con metales pesados de plomo (pb), zinc (zn) y plata (ag)

	T1	T2	T3
	Chocho	Nabo	Chocho Nabo
	(cm)	(cm)	(cm)
Promedios	12.04	13.20	1.289.52

Nota: En la tabla que antecede, se observa valores promedios en centímetros (cm) del crecimiento longitudinal (altura) de las especies vegetativas, en ese sentido en el comparativo se tiene en primer lugar al Nabo silvestre (T2) con mayor crecimiento de 13.20 cm, seguido del Chocho silvestre (T1) con 12.04 cm y por último el T3, con 1.28 cm para el Chocho silvestre y 9.52 cm para el Nabo silvestre.

Figura 6

Crecimiento longitudinal del lupinus tomentosus (chocho silvestre) y la brassica rapa (nabo silvestre) en suelos contaminados con metales pesados de plomo (pb), zinc (zn) y plata (ag)



Nota: En la figura que antecede, tal como se describe en la nota de la tabla 10. Se observa valores promedios en centímetros (cm) del crecimiento longitudinal (altura) de las especies vegetativas, en ese sentido en el comparativo se tiene en primer lugar al Nabo silvestre (T2) con mayor crecimiento de 13.20 cm, seguido del Chocho silvestre (T1) con 12.04 cm y por último el T3, con 1.28 cm para el Chocho silvestre y 9.52 cm para el Nabo silvestre.

4.2. ANÁLISIS INFERENCIAL

Tabla 13

Prueba estadística de rango con signo de wilcoxon, en la eficacia de la fitoextracción con la especie vegetativa de lupinus tomentosus (chocho silvestre) en metales pesados de plomo (pb), zinc (zn) y plata (ag) de suelos contaminados

Minerales pesados en suelo contaminado			
	N	Z	Sig. asintótica(bilateral)
Fitoextracción del Plomo (Pb)	25	-4.392	0.000
Fitoextracción del Zinc (Zn)	25	-4.392	0.000
Fitoextracción de Plata (Ag)	25	-4.392	0.000
Minerales pesados en sus raíces del Chocho silvestre			
Fitoextracción del Plomo (Pb)	25	-4.392	0.000
Fitoextracción del Zinc (Zn)	25	-4.392	0.000
Fitoextracción de Plata (Ag)	25	-4.392	0.000
Crecimiento longitudinal del Chocho silvestre			
Crecimiento longitudinal	25	-4.288	0.000
Propiedades químicas del suelo			
C.I.	25	-4.418	0.000
pH	25	-4.392	0.000

Nota: En la tabla anterior se presenta el resultado de la prueba estadística de rango con signo de Wilcoxon, aplicada al análisis de la fitoextracción de metales pesados en suelos contaminados mediante el uso del Chocho silvestre, donde se observan significancias de 0.000 (p-valor < 0,05) en los tres metales (Plomo, Zinc y Plata). Así mismo respecto a la absorción de metales pesado en los tallos y raíces de las plantas, también existe significancia de 0.000 (p-valor < 0,05) para los tres minerales (Plomo, Zinc y Plata). Respecto al crecimiento longitudinal del Chocho silvestre, también existe significancia de 0.000 (p-valor < 0,05). Por último, para las propiedades químicas de Conductividad eléctrica (C.I.) y Potencial de hidrógeno (pH) también existe significancia de 0.000 (p-valor < 0,05).

Tabla 14

Prueba estadística de rango con signo de wilcoxon, en la eficacia de la fitoextracción con la especie vegetativa de brassica rapa (nabo silvestre) en metales pesados de plomo (pb), zinc (zn) y plata (ag) de suelos contaminados

Minerales pesados en suelo contaminado			
	N	Z	Sig. asintótica(bilateral)
Fitoextracción del Plomo (Pb)	25	-4.392	0.000
Fitoextracción del Zinc (Zn)	25	-4.392	0.000
Fitoextracción de Plata (Ag)	25	-4.392	0.000

Minerales pesados en sus raíces del Nabo silvestre			
Fitoextracción del Plomo (Pb)	25	-4.392	0.000
Fitoextracción del Zinc (Zn)	25	-4.392	0.000
Fitoextracción de Plata (Ag)	25	-4.392	0.000
Crecimiento longitudinal del Nabo silvestre			
Crecimiento longitudinal	25	-4.112	0.000
Propiedades químicas del suelo			
C.I	25	-4.392	0.000
pH	25	-4.392	0.000

Nota: En la tabla anterior se presenta el resultado de la prueba estadística de rango con signo de Wilcoxon, aplicada al análisis de la fitoextracción de metales pesados en suelos contaminados mediante el uso del Nabo silvestre, donde se observan significancias de 0.000 (p-valor < 0,05) en los tres metales (Plomo, Zinc y Plata). Así mismo respecto a la absorción de metales pesado en los tallos y raíces de las plantas, también existe significancia de 0.000 (p-valor < 0,05) para los tres minerales (Plomo, Zinc y Plata). Respecto al crecimiento longitudinal del Nabo silvestre, también existe significancia de 0.000 (p-valor < 0,05). Por último, para las propiedades químicas de Conductividad eléctrica (C.I.) y Potencial de hidrógeno (pH) también existe significancia de 0.000 (p-valor < 0,05).

Tabla 15

Prueba estadística de rango con signo de wilcoxon, en la eficacia de la fitoextracción del tratamiento 3 con especies vegetativas unificadas del lupinus tomentosus (chocho silvestre) y el brassica rapa (nabo silvestre) en metales pesados de plomo (pb), zinc (zn) y plata (ag) de suelos contaminados

Minerales pesados en suelo contaminado			
	N	Z	Sig. asintótica(bilateral)
Fitoextracción del Plomo (Pb)	25	-4.392	0.000
Fitoextracción del Zinc (Zn)	25	-4.392	0.000
Fitoextracción de Plata (Ag)	25	-4.392	0.000
Minerales pesados en sus raíces del Chocho y Nabo silvestre			
Fitoextracción del Plomo (Pb)	25	-4.392	0.000
Fitoextracción del Zinc (Zn)	25	-4.392	0.000
Fitoextracción de Plata (Ag)	25	-4.392	0.000
Crecimiento longitudinal del Chocho y Nabo silvestre			
Crecimiento longitudinal (Chocho)	25	-4.379	0.000
Crecimiento longitudinal (Nabo)	25	-4.242	0.000
Propiedades químicas del suelo			
C.I	25	-4.392	0.000
pH	25	-4.392	0.000

Nota: En la tabla anterior se presenta el resultado de la prueba estadística de rango con signo de Wilcoxon, aplicada al análisis de la fitoextracción de metales pesados en suelos contaminados mediante el uso unificado del Chocho y Nabo silvestre (tratamiento 3), se observan significancias de 0.000 ($p\text{-valor} < 0,05$) en los tres metales (Plomo, Zinc y Plata). Así mismo respecto a la absorción de metales pesado en los tallos y raíces de las plantas, también existe significancia de 0.000 ($p\text{-valor} < 0,05$) para los tres minerales (Plomo, Zinc y Plata). Respecto al crecimiento longitudinal del Chocho silvestre, también existe significancia de 0.000 ($p\text{-valor} < 0,05$). Por último, para las propiedades químicas de Conductividad eléctrica (C.I.) y Potencial de hidrógeno (pH) también existe significancia de 0.000 ($p\text{-valor} < 0,05$).

CAPÍTULO V

DISCUSIÓN

De la investigación sus resultados confirman que la fitoextracción de metales pesados como el plomo (Pb), zinc (Zn) y plata (Ag) en suelos contaminados es efectiva utilizando las especies vegetativas *Lupinus tomentosus* (chocho silvestre) y *Brassica rapa* (nabo silvestre). El tratamiento que combinó ambas especies (*Lupinus tomentosus* y *Brassica rapa*) resultó ser el más eficiente, reduciendo la focalización de plomo, zinc y plata en el suelo en un 73.91%, 61.86% y 85.95%, respectivamente. Además de la reducción de metales, las características químicas del terreno, como la conductividad eléctrica (C.I.) y el pH, también mostraron mejorías significativas. Esto sugiere que el proceso de fitoextracción no solo impacta en la descontaminación del suelo, sino que también contribuye a la mejora general de su calidad, facilitando el crecimiento de plantas saludables.

Respecto al crecimiento longitudinal de las especies experimentadas, los resultados evidencian que el Nabo silvestre (T2) tuvo el mayor crecimiento con un promedio de 13.20 cm, seguido por el Chocho silvestre (T1) con 12.04 cm. En el tratamiento combinado (T3), el Nabo silvestre alcanzó 9.52 cm, mientras que el Chocho apenas 1.28 cm. Esto sugiere que la *Brassica rapa* se adapta mejor en condiciones contaminadas, mostrando un crecimiento superior en comparación con el *Lupinus tomentosus*. Estos hallazgos resaltan la importancia de seleccionar especies vegetales adecuadas para optimizar la fitorremediación, destacando al Nabo silvestre como una opción más efectiva para mejorar el crecimiento en ambientes contaminados.

Al contrastar los hallazgos logrados en esta investigación con los antecedentes revisados, se puede destacar una concordancia significativa en cuanto a la eficacia de la fitoextracción utilizando plantas en terrenos contaminados por metales pesados. Tal como lo reportan Sandoval (2019) y Vega (2018), la especie *Brassica rapa* ha mostrado resultados positivos en la rehabilitación de los suelos contaminados, específicamente en la fitoestabilización y la fitoextracción de metales como el plomo y el zinc. En nuestro estudio, tanto el *Lupinus tomentosus* como el *Brassica rapa*

demostrando ser efectivos en la reducción de plomo, zinc y plata en suelos contaminados. Esta similitud refuerza la validez de nuestras observaciones y confirma la efectividad de estas especies en la recuperación ambiental de áreas degradadas.

Si bien los hallazgos de esta investigación coinciden con estudios previos en cuanto a la eficacia de *Brassica rapa*, la principal diferencia radica en la incorporación del *Lupinus tomentosus* como especie fitoacumuladora. En estudios previos, como el de Vega (2018), esta especie no fue utilizada en combinación con otras plantas, lo que destaca como una contribución novedosa de esta investigación. Las conclusiones obtenidas sugieren que la combinación de ambas especies incrementa la eficacia de la fitoextracción, con un notable 73.91% de reducción en la concentración de plomo en suelos contaminados. Este hallazgo aporta un nuevo enfoque al uso de combinaciones de plantas para maximizar los resultados de remediación.

El aporte principal de esta actividad radica en la demostración empírica de que la combinación de *Lupinus tomentosus* y *Brassica rapa* mejora significativamente la fitoextracción de metales pesados en suelos contaminados. A diferencia de investigaciones previas, que se centraron en el uso de una sola especie, nuestra investigación presenta un modelo más eficiente y aplicable a gran escala para la descontaminación de suelos afectados por la actividad minera. Este enfoque no solo amplía el conocimiento sobre la fitorremediación, ofrece también una solución práctica para áreas altamente degradadas, como las zonas mineras abandonadas de Pasco.

Los resultados obtenidos están en concordancia con las expectativas iniciales planteadas en la hipótesis. Se anticipaba que tanto el *Lupinus tomentosus* como el *Brassica rapa* tendrían un efecto positivo en la fitoextracción de plomo, zinc y plata, y esto se cumplió. De hecho, el porcentaje de reducción en la concentración de metales superó las expectativas, especialmente en el caso del plomo, que se redujo en más del 70% en el tratamiento combinado.

Aunque el diseño experimental utilizado en esta investigación resultó adecuado para evaluar la eficacia de las especies vegetativas, es posible mejorar la obtención de datos a nivel metodológico. Una recomendación sería

extender el periodo de observación para obtener datos más robustos sobre la evolución de las propiedades del suelo y el crecimiento de las plantas. Además, podría implementarse un análisis más detallado de las condiciones climáticas y edáficas que podrían influir en la eficiencia de la fitoextracción.

Una de las principales limitaciones encontradas fue la variabilidad en las condiciones del suelo y las fluctuaciones climáticas durante el desarrollo del experimento. Estas variables pueden haber afectado el incremento de las plantas y la absorción de metales pesados, lo que podría haber generado cierta dispersión en los resultados. Asimismo, la falta de acceso a tecnología más avanzada en la supervisión continuo de los niveles de metales en tiempo real representó una barrera para obtener datos más detallados.

El diseño experimental de esta investigación es sencillo y bien estructurado, lo que permite que sea replicado por otros investigadores. Se proporcionan detalles sobre las cantidades de suelo, las especies utilizadas y las metodologías de análisis, lo que facilita la reproducción de los experimentos en otros contextos o con otras especies fitoacumuladoras. La replicabilidad de este estudio es alta, siempre que se consideren las variables locales de suelo y clima.

Este trabajo abre un amplio espacio en las investigaciones futuras en el campo de la fitorremediación. Por un lado, se podría investigar la eficacia de otras combinaciones de especies vegetales que puedan complementar los efectos observados en este estudio. Por otro lado, sería interesante examinar el impacto a largo plazo de la fitoextracción en la calidad del suelo, especialmente en términos de su capacidad para soportar el crecimiento agrícola o forestal después del proceso de remediación.

Esta investigación aporta al campo de la fitorremediación nuevos conocimientos sobre la interacción sinérgica entre especies vegetales y su habilidad en la mejora de la eficacia de la fitoextracción.

Al destacar el potencial de *Lupinus tomentosus* en combinación con *Brassica rapa*, se ofrecen nuevas alternativas como la rehabilitación de los suelos contaminados, especialmente en áreas afectadas por la minería. Además, las conclusiones sugieren que el enfoque propuesto es una estrategia sostenible y de bajo costo que puede ser implementada en diversas regiones con problemas de contaminación por metales pesados.

CONCLUSIONES

Del presente estudio se concluye a partir de las metas planteadas en la investigación:

- **Con respecto al objetivo general;** Se concluye que ambos tratamientos fueron eficaces, con una mayor efectividad cuando ambas especies se utilizaron de manera combinada. En términos cuantitativos, el tratamiento combinado redujo los niveles de plomo en un 73.91% (de 8850 ppm a 2309.22 ppm), el zinc en un 61.86% (de 11200 ppm a 4271.87 ppm) y la plata en un 85.95% (de 39.42 ppm a 5.54 ppm). Estos resultados demuestran que la combinación de las dos especies es altamente efectiva para la fitoextracción, lo que sugiere que esta técnica es una solución sostenible rehabilitadora para los suelos contaminados por actividades mineras. Además, la investigación respalda la viabilidad operativa y económica de implementar esta técnica en regiones afectadas con la contaminación de metales pesados.
- **Con respecto al objetivo específico 1;** El *Lupinus tomentosus* (T1) logró reducir los niveles de plomo en un 63.81% (de 8850 ppm a 3202.67 ppm), el zinc en un 53.60% (de 11200 ppm a 5196.58 ppm) y la plata en un 80.62% (de 39.42 ppm a 7.64 ppm). Estos resultados muestran que esta especie tiene una alta capacidad para acumular y remover metales pesados del suelo, especialmente la plata, que presentó una de las mayores reducciones. Además, el *Lupinus tomentosus* demostró una notable resistencia en su crecimiento en condiciones de suelos contaminados, lo que refuerza su potencial para ser utilizado en futuros programas de fitorremediación a gran escala.
- **Con respecto al objetivo específico 2;** El tratamiento con *Brassica rapa* (T2) fue también eficaz, con reducciones de plomo del 60.35% (de 8850 ppm a 3509.07 ppm), de zinc en un 44.31% (de 11200 ppm a 6236.74 ppm) y de plata en un 79.93% (de 39.42 ppm a 7.91 ppm). Aunque su capacidad para reducir los niveles de metales fue ligeramente inferior a la de *Lupinus tomentosus*, *Brassica rapa* demostró ser particularmente eficaz en la absorción de plomo y zinc. Esto sugiere que esta especie puede ser

utilizada en conjunto con otras plantas, o de forma aislada, en situaciones donde la contaminación por plomo y zinc sea predominante, optimizando la remediación en suelos con diferentes composiciones de metales.

- **Con respecto al objetivo específico 3;** La combinación de *Lupinus tomentosus* y *Brassica rapa* (T3) resultó ser el tratamiento más eficaz, con reducciones del 73.91% en plomo, del 61.86% en zinc, y del 85.95% en plata. Estos resultados indican una clara sinergia entre ambas especies, lo que maximiza la habilidad de extracción en los metales pesados del suelo. Además de los beneficios en la reducción de los contaminantes, el uso combinado de estas especies contribuyó a mejorar los componentes químicos y biológicas del suelo, favoreciendo su recuperación a largo plazo. Esto resalta el potencial de utilizar tratamientos combinados como una solución integral para la fitorremediación de áreas extensamente contaminadas.

RECOMENDACIONES

- Realizar análisis previos referentes a la eficacia y/o capacidad de fitoextracción de cada uno de sus partes de las plantas vegetativas y así mismo también otro análisis por la edad de las plantas.
- Realizar in-situ el experimento de eficacia de fitoextracción con las dos especies utilizados para esta tesis, y así poder contrastar los resultados y analizar sus diferencias.
- Realizar experimentos de eficacia de fitoextracción con las mismas especies vegetativas, para otros metales pesados en suelos contaminados diferentes a los utilizados en este trabajo de investigación.
- Experimentar el trabajo de eficacia fitoextractora de metales pesado en suelos contaminados, en un periodo de tiempo más prolongado y así se pueda observar la evolución máximo de las plantas y su mejora de los suelos.
- Realizar análisis de todos los elementos en las características físicas y químicas de los suelos contaminados por metales pesados, antes, durante y después de la intervención del experimento, donde puede tener resultados relevantes para el análisis de mejora de los suelos a través de la fitoextracción.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abollino O., A. M. (2002). Distribución y Movilidad de Metales en Sitios Contaminantes. En Contaminación Ambiental (págs. 119-177). México: Investigación Quimiométrica de perfiles de Contaminantes.
- Adams. (1995). *Fundamentos de Química de suelos*. Venezuela: Universidad central de Venezuela.
- Álvarez, I., & Sánchez, R. (2019). *Prueba piloto para la fito extracción de cadmio usando Helianthus annuus en un suelo proveniente de la vereda El Zaden – Mesitas del colegio*. Bogotá: Universidad de La Salle. Facultad de Ingeniería. Ingeniería.
- Ambiente, A. E. (12 de Junio de 2004). *Grupo temático de indicadores sobre el suelo y su uso*. Obtenido de ocupación del suelo, permeabilidad, gestión de sitios contaminados y carbono orgánico en el suelo: <https://www.eea.europa.eu/es/themes/soil/intro>
- Angelova V., I. R. (2004). Bioacumulación de Metales Pesados en Cultivos de Fibra. En *Cultivos Industriales y Productos* (págs. 197-205). México: Tropical y Subtropical Vol.10.
- Antonovics, Bradshaw, & Tumer. (1971). Tolerancia de metales pesados en plantas. En *Avances en la investigación ecológica*. (págs. 619 - 623). Ecological.
- Baker. (1987). Tolerancia al metal. Nuevo Fitol.
- Barcelo, & Poschhenrieder. (2003). Principios y perspectivas. En *Fitorremediación* (págs. 333-334). Construcciones a la ciencia.
- Barrientos, T. (2012). Fitorremediación. Estado del Arte. Trabajo de grado Especialista en Ingeniería Ambiental, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.
- Becerril, Barrutia, Garcia, P., Hernández, O., & Garbisu. (2007). *Especies nativas de suelos contaminados por metales. Aspectos ecofisiológicos y su uso en fitorremediación ecosistemas*.
- Birley, & Lock. (1999). *Salud y producción de recursos naturales*. Perú: Medio Ambiente y Urbanización.
- Bradshaw , & Mcneilly. (1985). Evolución y Contaminación. Ed Omega.

- Bradshaw. (1884). Adaptación de plantas a suelos que contienen metales tóxicos. En *Una prueba para presunción* (págs. 4 - 19). Origen y desarrollo de la adaptación Simposio de la fundición CIBA.
- Bradshaw, Tumer, & Antonovics. (1971). Tolerancia a metales pesados en plantas. Avance en la investigación ecológica.
- Bradshaw, Williamson, & Johnson. (1982). Recuperación de desechos mineros. En *Minería*. Londres: Libros de diario.
- Brandt, R. (2003). Potential of vetiver (*Vetiveria zizanioides* (L.) Nash) for the use in phytoremediation of petroleum hydrocarbon-contaminated soils in Venezuela. Tesis Curso Ecología del Paisaje. Münster. Westfälische Wilhelms-Universität Münster. Institut für Landschaftsökologie, Alemania.
- Carbajal, B., & Quispe, Y. (2019). *Fitoextracción de Pb y Cr de relaves mineros de la poza Santa Catalina del distrito de Quiruvilca, Santiago de Chuco usando la especie brassica juncea*. La libertad: Universidad Nacional de Trujillo.
- Carpaena, R. & Bernal, M. (2007). Claves de la fitorremediación: fitotecnologías para la recuperación de suelos. *Ecosistemas*, 16 (2), 1-3.
- Casas. (2012). El suelo de cultivo y de las condiciones climáticas. España: Paraninfo.
- Chaney, Brown, Angie, Homer, & Green. (1995). Opinión actual en Biotecnología. En *Fitorremediación de materiales del suelo*. (págs. 279-284). Biotecnología.
- Córdova. (2010). *Aplicación de enmiendas orgánicas con distinta relación de relaves mineros. Implicancias en el crecimiento de acacia caven y en la actividad microbiana*. Chile: Universidad de Chile; Facultad de Ciencias Forestales; Departamento de Silvicultura.
- Cunningham, S. D., Berti, W. R., & Huang, J. W. (1995). Phytoremediation of contaminated soils. *Trends in Biotechnology*, 13(9), 393-397. [https://doi.org/10.1016/S0167-7799\(00\)88987-8](https://doi.org/10.1016/S0167-7799(00)88987-8)
- Cynthia, J. (2020). *Análisis descriptivo del helianthus annuus y zeamays como acumuladores de (Cd, Pb) para la recuperación de suelos agrícolas*. Guayaquil - Ecuador: Universidad Agraria del Ecuador.

- D., R. (2001). *Mecanismos de absorción de micrinutrientes en plantas*. Australia: Australiano Fisiología de las plantas.
- Davila , R. (2019). *Recuperación De Suelo Contaminado por Plomo con Vetiveria (Chrysopogon Zizanioides) Bajo Condiciones de Vivero en la Esperanza*. Huánuco: Universidad de Huánuco .
- Delgadillo López, A., Gonzales Ramírez, C., Prieto García, F., Villagómez Ibarra, J. & Acevedo Sandoval, O.(2011). Fitorremediación: una alternativa para eliminar contaminación Tropical and subtropical Agroecosystems [en línea], 2011, (México), 14 (2), pp. 597-612. [Consulta: 03 de septiembre de 2017]. ISSN 1870-0462. Disponible en:http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S187004622011000200002&script=sci_arttext
- Díez Lázaro, J. (2009). Fitocorrección de suelos contaminados con metales pesados: Evaluación de plantas tolerantes y optimización del proceso mediante prácticas agronómicas [Http://purl.org/dc/dcmitype/Text, Universidade de Santiago de Compostela]. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=108117>
- Dorronsoro. (2015). En *Descontaminación del suelo* (pág. 90). España: Universidad de Granada.
- Dorronsoro. (2002). *Contaminación por metales pesados* . España: Departamento de edafología y química agrícola de España.
- EPA — U.S. Environmental Protection Agency. (1999). Phytoremediation resource guide. U.S. Washington, D.C. U.S. Environmental Protection Agency Office of Solid Waste and Emergency Response Technology Innovation Office.
- Eróstegui, R. (25 de junio de 2009). *Contaminación por metales pesados*. Obtenido de Revista Científica Médica: http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1817-74332009000100013
- FAO. (2018). *Contaminación del Suelo*. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- Fernandez, A. (2019). *Identificación de especies vegetales nativas acumuladoras de cadmio en el caserío de Picuruyacu alto, distrito de*

Castillo grande, provincia de Leoncio Prado. Huánuco : Tesis para optar el título profesional.

- Ferrera, R., Alarcón, A., Mendoza, M., Sangabriel, W., Trejo, D., Cruz, S., López, C. & Delgadillo, J. (2007). Fitorremediación de un suelo contaminado con combustóleo utilizando *Phaseolus coccineus* y fertilización orgánica e inorgánica. *Agrociencia*, 41 , 817-826.
- Freire, F. (2008). Técnicas de remediación ambiental de suelos contaminados con hidrocarburos en el área de influencia de operaciones de petroproducción del nororiente ecuatoriano de la piscina Shushufindi 17-1 (PEPDA). Tesis de pregrado Tecnólogo en petróleos. Universidad Tecnológica Equinoccial, Quito, Ecuador.
- Frick, C. (1999). *Valoración de la fitorremediación como técnica de limpieza in situ, sitios contaminados con aceite*. Canadá: Alianza de tecnologías petrolera, Columbia Británica.
- Galan Huertas, E., & Romero Baena, A. (2018). *Contaminación de suelo por metales pesados*. España: Sociedad española de mineralogía.
- García , & Dorronsoro. (2005). *Contaminación por metales pesados en tecnologías de suelos* . España: Universidad de Granada Departamento de Edafología y Química Agrícola.
- García. (2013). Adición de dosis elevadas de residuos orgánicos de origen urbano y su implicación en la fijación de carbono. En *Estrategias para la recuperación de suelos degradados en ambientes semiáridos*. (pág. 321). Murcia: Universidad de Murcia.
- García Zamorano, F., Ruiz Coletto, F., Cano Rodríguez, J., Pérez García, J., & Molina de la Rosa, J. (2004). *Suelo, riego, nutrición y medio ambiente del olivar*. Viseconsejería Servicio de Publicaciones y Divulgación.
- Ginocchio, & Baker. (2004). Metalophytes en latinoamérica: un notable biólogo y recurso genético poco conocido y estudiado en la región. *Revista Chilena de historia natural*, 185, 194.
- Ghosh, M. & Singh, S. (2005). A review on phytoremediation of heavy metals and utilization of its byproducts. *Applied ecology and environmental research*, 3(1), 1-18. 21. Gutiérrez, M. (1997). Nutrición mineral de las plantas: avances y aplicaciones. *Agronomía Costarricense*, 21(1), 127-137.

- Gratao, Polle, Lea, & Azevedo. (2005). *Haciendo que la vida de las plantas acentuadas por metales pesados sea un poco más elegante*. Biología vegetal funcional.
- Gutiérrez, Bautista, & Del castillo, E. (2004). *Calidad del suelo e indicadores*. GBIF Secretariat. (2023). *Lupinus tomentosus* DC. GBIF Backbone Taxonomy. Recuperado de <https://www.gbif.org/species/2963841>
- Hall. (2002). *Mecanismos celulares de desintoxicación y tolerancia de metales pesados*. Diario de botánica.
- Hernández. (2012). Especiación de metales pesados contaminantes en los suelos y acuífero del Rio de los remedios. México. Instituto Politécnico Nacional.
- Hernández. (2011). Biorecuperación de suelos salinos con el uso de materiales orgánicos. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- Ibañez, S., & Moreno, R. (2010). *Textura de un suelo*. Valencia: Universitat Politècnica de valència.
- INEI. (2016). *Mineria*. Perú: Instituto Nacional de Estadística e Informática.
- John, D. (1983). Toxicología Ambiental. Edimburgo: Ediciones Omega.
- Kabata, & Pendias y Pendias. (2000). *Trazar elementos en suelos y Plantas Tercera edición*. Estados Unidos: CRC Press. Boca Ratón.
- Kiuper, D. (1984). Diferenciación genética y plasticidad fenotípica en poblaciones de respuesta de *Plantago Lanceolata* l al nivel de nutrientes. En Jacquard, Heim, & Antonovis, *Diferenciación y genética* (págs. 251 - 269). Ciencia ecológica.
- Lal. (1998). Impacto agronómico de la degradación del suelo; métodos de la evaluación de la degradación del suelo. En *Avances en la ciencia del suelo* (pág. 459; 473). Florida, Estados Unidos.: Prensa CRC, Boca Ratón.
- Lenntech. (1 de Septiembre de 2017). Copyright 1998-2017 Lenntech B.V. ALL rights reserved. Obtenido de <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/Pb.htm>
- Lindsay, M. (1979). *Diferencias Genotípicas en suelos* . Nueva York: Jonh Wiley y Sins.

- López, & Grau. (2005). *Metales pesados, materia orgánica y otros parámetros de la capa superficial de los suelos agrícolas y de los pastos de la España peninsular. II resultados por provincias*. España: Educación y Ciencia del Instituto Nacional de Tecnología Agraria y Alimentaria.
- López, S. , Gallegos, M., Pérez, L. & Gutierrez, M. (2005). Mecanismos de fitorremediación de suelos contaminados con moléculas orgánicas xenobióticas. *Rev. Int. Contam.Ambient.*, 21 (2), 91-100.
- Lumelli, M. (2006). Fitorremediación: otro regalo del reino vegetal. Recuperado de: <http://goo.gl/cPmYDE>
- Machado, G. (2009). *Medida de la conductividad eléctrica aparente del suelo por inducción electromagnética*. España: Universidad de Santiago de Compostela.
- Mackova, Macek, Francova, & Sura. (2006). Fitorremediación de suelos contaminados con metales. En *Plantas modificadas genéticamente con propiedades para fines de fitorremediación*. (págs. 85-108).
- Macnair , M. (2002). Variación genética dentro y entre las poblaciones para la acumulación de Zinc en Arabidopsis. *Nuevo fitólogo*.
- Mengel, & Konrad. (1987). Principio de Nutrición Vegetal. En Kirkby, & Ernest, *Instituto internacional de Potasa* (pág. 607). Suiza: cuarta edición.
- Mentaberry, A. (2009). Fitorremediación, [diapositivas] Buenos Aires: Curso de Agrobiotecnología, Departamento de Fisiología, Biología Molecular y Celular, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, 67 diapositivas.
- Millan, Carpena, Schmid, & Sierra. (2007). Estrategias aplicables en el area de almaden . En Sierra, Moreno, Peñalosa, & E. J, *Rehabilitación de suelos contaminados con mercurio* (pág. 2). Ecosistemas.
- MINEM. (2019). *Minería Informal*. Perú: Conexionesan.
- Ministerio del Ambiente (MINAM). (2014). Resolución Ministerial N° 085-2014-MINAM. Aprobación de la Guía para el Muestreo de Suelos y la Guía para la Elaboración de Planes de Descontaminación de Suelos.
- Monterroso, Kidd, Becerra Castro, & Garcia , L. (2007). Aplicación de plantas hiperacumuladoras de níquel en la fitoextracción natural. El género *Alyssum* L. *Ecosistemas*.

- Muñoz, L., Nevárez, G., Ballinas, M. & Peralta, M. (2010). Fitorremediación como una alternativa para el tratamiento de suelos contaminados. *Revista Internacional de ciencia y tecnología biomédica*, Toctli, 1 (3), 1-9.
- Navarro. (2003). Química agrícola. En *Mundi prensa* (pág. 432). Madrid: segunda edición.
- Nicholson, & Drexler, D. (1993). *Micromineralogía de Residuos en relación con la biodisponibilidad del plomo*. Montana: Butte Environ Sci.
- Núñez, R., Meas, Y., Ortega, R. & Olguin, E. (2004). Fitorremediación: fundamentos y aplicaciones, *Biotecnología y Biología Molecular*. Ciencia, Julio-septiembre, 69-82.
- Ordoñez, H. (2019). *Determinación del efecto residual de plomo y cadmio en las hortalizas (Lactuca sativa, daucus carota y apium graveolens) que se expenden en el mercado nuevo de Huánuco*. Huánuco: Universidad de Huánuco.
- Pérez, R. (2015). *Fitoextracción de plomo de dos suelos contaminados utilizando espinaca y tres agentes quelatantes*. México: Tesis (Ingeniero agrícola y ambiental), Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, División de Ingeniería.
- Perú, Ministerio del Ambiente. (2013). Decreto Supremo N° 002-2013-MINAM [Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Suelo]. Publicado en El Peruano. <https://www.minam.gob.pe/calidadambiental/wp-content/uploads/sites/22/2013/10/D-S-N-002-2013-MINAM.pdf>
- Pilon, S. (2005). Fitorremediación. En *Remediación de plantas* (págs. 15 - 39). Annu Biol.
- Pivetz, P. (2001). *Fitorremediación de suelos y aguas subterráneas contaminados a sitios de desechos peligrosos*. Oficina de Residuos Sólidos y Respuesta a Emergencias. Washington: United States Environmental Protection Agency.
- Porta, C. J.; López - Acevedo, R. M.; Roquero, de L. C. (1994). Edafología: para la agricultura y el medio ambiente. Mundi -- Prensa, 807 P. España.
- Porta. (2003). Edafología para la agricultura y el medio ambiente. En López, & Roquero. Madrid: Ediciones Mundi Prensa.

- Poschenrieder, Bech, Barcelo, & Lansac. (2002). Plantas que estropean el área sudamericana como fuentes de germoplas, para fitorremediación, tecnologías. En *Acta Biotechnol* (págs. 1-2, 5-11).
- Prasad, & Hagemeyer. (1999). *Tolerancia de metales pesados en plantas*. Berlin: Avances en la investigación ecológica.
- Ramirez Pérez, F. (2015). *Fitoextracción de plomo de dos suelos contaminados utilizando espinaca y tres agentes quelatantes*. México: División de Ingeniería . Obtenido de Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.
- Raskin, & Ensley. (2000). Uso de plantas para limpiar el medio ambiente. En J. Wiley, & Sons, *Fitorremediación de metales tóxicos*. Nueva York.
- Reeves. (2006). Fitorremediación de suelos contaminados por metales. En *Hiperacumulación de oligoelementos por plantas* (págs. 25-52). Ed. Saltador.
- Reid, D. (2001). *Mecanismos de absorción de micronutrientes en plantas*. Australia: Australiano Fisiología de las plantas.
- Roca, F. (2023). *Centro de Investigaciones Agrarias de Mabegondo. INGACAL. Xunta de Galicia*. Obtenido de <https://infoagro.com/documentos/imprimir.asp?iddoc=53&idcap=1>
- Rosales Arévalo y Villavicencio Criollo. (2018). Evaluación de la eficiencia de *Brassica rapa subsp. oleífera* (Nabo silvestre) en la reducción de plomo y cadmio en los lodos residuales de la planta de tratamiento de aguas del Cantón Penipe. Obtenido de <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/8938/1/236T0337.pdf>
- Rzedowski, J., & Calderon Rzedowski, G. (2010). Flora Fanerogámica del Valle de México. In *Lexicon of Pulse Crops*. <https://doi.org/10.1201/b22282-12>
- Salas , M., Gonzales, L., Hernandez, M., & Vega, H. (2017). *Estabilización de metales pesados en jales mediante vegetación endémica e introducida en fresnillo, zacatecas*. México: Biotecnología y sustentabilidad.

- Sandoval, J. (2019). *Comparación de dos especies altoandinas Urtica urens L. Y Brassica rapa L. en la recuperación de suelos contaminados por plomo en cátaç. Áncash: Universidad Científica del Sur.*
- Selina Wamucii. (2023). Lupinus tomentosus - Uses, Benefits & Care. Recuperado de <https://www.selinawamucii.com>.
- SMOLDERS, E., BRANS, K., FOLDI, A., & MERCKX, R. Cadmium fixation in soils measured by isotopic dilution. *Soil Science Society of American Journal*, 63(1), 78-85. 1999.
- SMOLDERS, E. and MERTENS J. Cadmium. B. J. Alloway (ed.). *Heavy Metals in Soils: Trace Metals and Metalloids in Soils and their Bioavailability, Environmental Pollution* 22, DOI. Springer Science+Business Media Dordrecht. 2013.
- Sun, Zhou, & Diao. (2008). Efectos del cadmio y el arsénico sobre el crecimiento y acumulación del metal de Cd-hiperacumulador Solanum nigrum L. En L. *Bioresource* (pág. 99). Bioresource Tecnología.
- Supo, J., & Zacarías, H. (2020). *Metodología de la Investigación Científica: Para las Ciencias de la Salud y las Ciencias Sociales*. . Perú: Independently published.
- Torres, K. & Zuluaga, T. (2009). Biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos. tesis de pregrado Ingeniería Química. Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia.
- Vega, O. (2018). Capacidad de fitoacumulación de Zinc (Zn) y Plomo (Pb) utilizando las especies de chocho silvestre (Lupinus tomentosus) y llantén (Plantago mayor) del relave de la planta concentradora de minerales Santa Rosa de Jangas. Ancash: UNIVERSIDAD NACIONAL.
- Vidali, M. (2001). Bioremediation an overview. *Pure Appl. Chem.*, 73(7), 1163-1172.
- Volke, & Velasco. (2016). Tecnologías de remediación para suelos contaminados. *Instituto Nacional de Ecología.*, 62.
- Wheeler, C. T. and I. M. Miller. 1990. Current and potential uses of actinorhizal plants in Europe. pp. 365-389. *In: C. R. Schwintzer and J. D. Tjepkema (eds.). The biology of frankia and actinorhizal plants. Academic Press. San Diego, CA, USA.*

Wong. (2003). Restauración ecológica de suelos degradados por minas. En
Con énfasis de suelos contaminados por metales pesados. (págs. 775-
780). Quimiósfera.

COMO CITAR ESTE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

Osorio Yacolca, A. (2025). *Eficacia de la fitoextracción de metales pesados en suelos contaminados, utilizando las especies de Chocho silvestre (Lupinus Tomentosus) y Nabo silvestre (Brassica Rapa), en la provincia de Pasco* [Tesis de pregrado, Universidad de Huánuco]. Repositorio Institucional UDH. <http://...>

ANEXOS

ANEXO 1

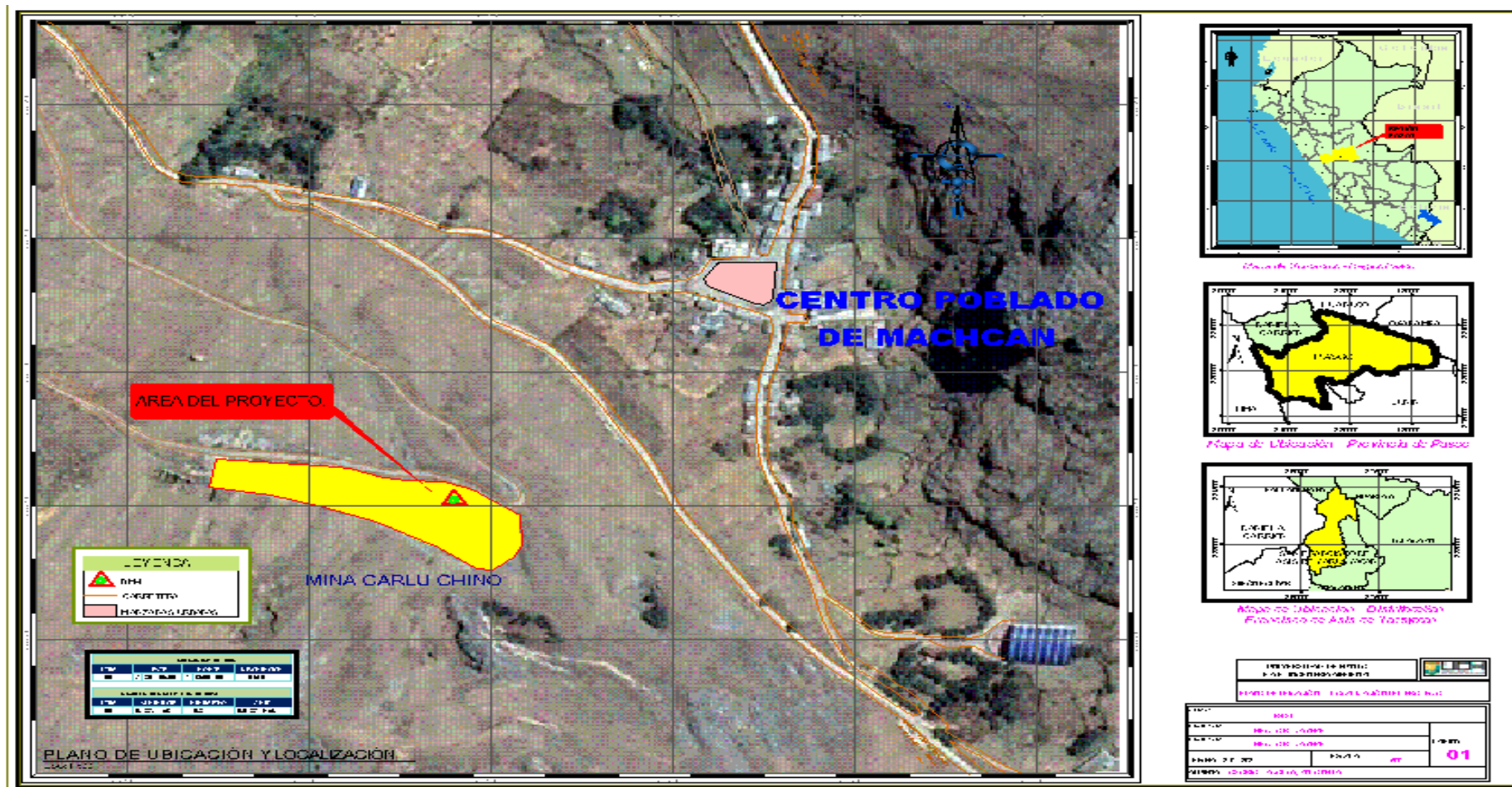
MATRIZ DE CONSISTENCIA

Problemas	Objetivos	Hipótesis	Variables y dimensiones	Diseño de la investigación	Población y muestra
Problema general: ¿Cuál es la eficacia de la fitoextracción de metales pesados (plomo, zinc y plata) en suelos contaminados, utilizando las especies de nombres <i>Lupinus tomentosus</i> (Chocho silvestre) y <i>Brassica rapa</i> (Nabo silvestre) en el 2024?	Objetivo general: Determinar la eficacia de la fitoextracción de metales pesados (plomo, zinc y plata) en suelos contaminados, utilizando las especies de nombres <i>Lupinus tomentosus</i> (Chocho silvestre) y <i>Brassica rapa</i> (Nabo silvestre).	Hipótesis General Hi: Resultara eficaz la fitoextracción de metales pesados (plomo, zinc y plata) en suelos contaminados, utilizando las especies de nombres <i>Lupinus tomentosus</i> (Chocho silvestre) y <i>Brassica rapa</i> (Nabo silvestre). Ho: No resultara eficaz la fitoextracción de metales pesados (plomo, zinc y plata) en suelos contaminados, utilizando las especies de nombres <i>Lupinus tomentosus</i> (Chocho silvestre) y <i>Brassica rapa</i> (Nabo silvestre).	Variable de calibración Fitoextracción con <i>Lupinus tomentosus</i> y <i>Brassica rapa</i>	Diseño experimento verdadero; se trabajó con tres grupos, (Supo y Zacarias, 2020) X: GE1:01-X1-02GE2: 01-X2-02 01-X3-02 Donde: GE1: Fitoextracción usando <i>Lupinus tomentosus</i> (X1) primera intervención GE2: Fitoextracción	La población de muestra está conformada por los suelos contaminado s de metales pesados a causa de la mina abandonada.
Específicos: Pe1. ¿Cuál es la eficacia de la fitoextracción de metales pesados (plomo, zinc y plata) en suelos contaminados, utilizando la especie de nombre	Específicos: Oe1. • Evaluar la eficacia de la fitoextracción de metales pesados (plomo, zinc y plata) en suelos contaminados, utilizando	Hipótesis Secundarios Hi: Resultara eficaz la fitoextracción de metales pesados (plomo, zinc y plata) en suelos contaminados, utilizando la especie de nombre <i>Lupinus tomentosus</i> (Chocho silvestre).	Variable evaluativa Suelo contaminado por metales pesados	Y: Fitoextracción	

<i>Lupinus tomentosus</i> especie de nombre Ho: No resultara eficaz la fitoextracción de (Chocho silvestre)? <i>Lupinus tomentosus</i> metales pesados (plomo, zinc y plata) en	usando <i>Brassica rapa</i> (X2)
Pe2. ¿Cuál es la eficacia (Chocho silvestre). suelos contaminados, utilizando la especie de	segunda
de la fitoextracción de Oe2. • Evaluar la eficacia nombre <i>Lupinus tomentosus</i> (Chocho	intervención
metales pesados (plomo, de la fitoextracción de silvestre).	GE3:
zinc y plata) en suelos metales pesados (plomo, Hi: Resultara eficaz la fitoextracción de	Fitoextracción
contaminados, utilizando zinc y plata) en suelos metales pesados (plomo, zinc y plata) en	usando <i>Lupinus tomentosus</i> +
la especie de nombre contaminados, utilizando la suelos contaminados, utilizando la especie de	<i>Brassica rapa</i> L.
<i>Brassica rapa</i> (Nabo especie de nombre nombre <i>Brassica rapa</i> (Nabo silvestre).	(X3) tercera
silvestre)? <i>Brassica rapa</i> (Nabo Ho: No resultara eficaz la fitoextracción de	intervención
Pe3. ¿Cuál es la eficacia silvestre). metales pesados (plomo, zinc y plata) en	O1: Medición
de la fitoextracción de Oe3. • Evaluar la eficacia suelos contaminados, utilizando la especie de	inicial
metales pesados (plomo, de la fitoextracción de nombre <i>Brassica rapa</i> (Nabo silvestre).	O2: Medición
zinc y plata) en suelos metales pesados (plomo, Hi: Resultara eficaz la fitoextracción de	final
contaminados, utilizando zinc y plata) en suelos metales pesados (plomo, zinc y plata) en	
dos especies de contaminados, utilizando suelos contaminados, utilizando dos especies	
nombres, <i>Lupinus</i> dos especies de nombres, de nombres, <i>Lupinus tomentosus</i> (Chocho	
<i>tomentosus</i> (Chocho <i>Lupinus tomentosus</i> silvestre) y <i>Brassica rapa</i> (Nabo silvestre).	
silvestre) y <i>Brassica rapa</i> (Chocho silvestre) y Ho: No resultara eficaz la fitoextracción de	
(Nabo silvestre)? <i>Brassica rapa</i> (Nabo metales pesados (plomo, zinc y plata) en	
silvestre). suelos contaminados, utilizando dos especies	
de nombres, <i>Lupinus tomentosus</i> (Chocho	
silvestre) y <i>Brassica rapa</i> (Nabo silvestre).	

ANEXO 2

MAPA DE UBICACIÓN



ANEXO 3

RESOLUCIÓN DE APROBACIÓN DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

UNIVERSIDAD DE HUÁNUCO *Facultad de Ingeniería*

RESOLUCIÓN N° 0322-2025-D-FI-UDH

Huánuco, 26 de febrero de 2025

Visto, el Oficio N° 104-2025-C-PAIA-FI-UDH, mediante el cual el Coordinador Académico de Ingeniería Ambiental, remite el dictamen de los jurados revisores, del Informe Final de Trabajo de investigación (Tesis) intitulado: "EFICACIA DE LA FITOEXTRACCIÓN DE METALES PESADOS EN SUELOS CONTAMINADOS, UTILIZANDO LAS ESPECIES DE CHOCHO SILVESTRE (*Lupinus tomentosus*) y NABO SILVESTRE (*Brassica rapa*), EN LA PROVINCIA DE PASCO", presentado por el (la) Bach. **Antonella Betsabe OSORIO YACOLCA**.

CONSIDERANDO:

Que, mediante Resolución N° 006-2001-R-AU-UDH, de fecha 24 de julio de 2001, se crea la Facultad de Ingeniería, y;

Que, mediante Resolución de Consejo Directivo N° 076-2019-SUNEDU/CD, de fecha 05 de junio de 2019, otorga la Licencia a la Universidad de Huánuco para ofrecer el servicio educativo superior universitario, y;

Que, mediante Resolución N° 3149-2023-D-FI-UDH, de fecha 20 de diciembre de 2023, se aprobó el Trabajo de Investigación (Tesis) y su ejecución, de la Bach. **Antonella Betsabe OSORIO YACOLCA**, y;

Que, según Oficio N° 104-2025-C-PAIA-FI-UDH, del Coordinador Académico quien informa que los JURADOS REVISORES del Informe Final de Trabajo de Investigación (Tesis) intitulado: "EFICACIA DE LA FITOEXTRACCIÓN DE METALES PESADOS EN SUELOS CONTAMINADOS, UTILIZANDO LAS ESPECIES DE CHOCHO SILVESTRE (*Lupinus tomentosus*) y NABO SILVESTRE (*Brassica rapa*), EN LA PROVINCIA DE PASCO", presentado por el (la) Bach. **Antonella Betsabe OSORIO YACOLCA**, integrado por los siguientes docentes: Mg. Frank Erick Camara Llanos (Presidente), Mg. Jorge Antonio Romero Estacio (Secretario) y Mg. Sarita Deniz Prado Valenzuela (Vocal), quienes declaran APTO para la Sustentación de su Tesis, y;

Estando a las atribuciones conferidas al Decano de la Facultad de Ingeniería y con cargo a dar cuenta en el próximo Consejo de Facultad.

SE RESUELVE:

Artículo Único. - APROBAR, el Informe Final de Trabajo de Investigación (Tesis) intitulado: "EFICACIA DE LA FITOEXTRACCIÓN DE METALES PESADOS EN SUELOS CONTAMINADOS, UTILIZANDO LAS ESPECIES DE CHOCHO SILVESTRE (*Lupinus tomentosus*) y NABO SILVESTRE (*Brassica rapa*), EN LA PROVINCIA DE PASCO", presentado por el (la) Bach. **Antonella Betsabe OSORIO YACOLCA**, para optar el Título Profesional de Ingeniero(a) Ambiental del Programa Académico de Ingeniería Ambiental de la Universidad de Huánuco.

REGÍSTRESE, COMUNÍQUESE Y ARCHÍVESE

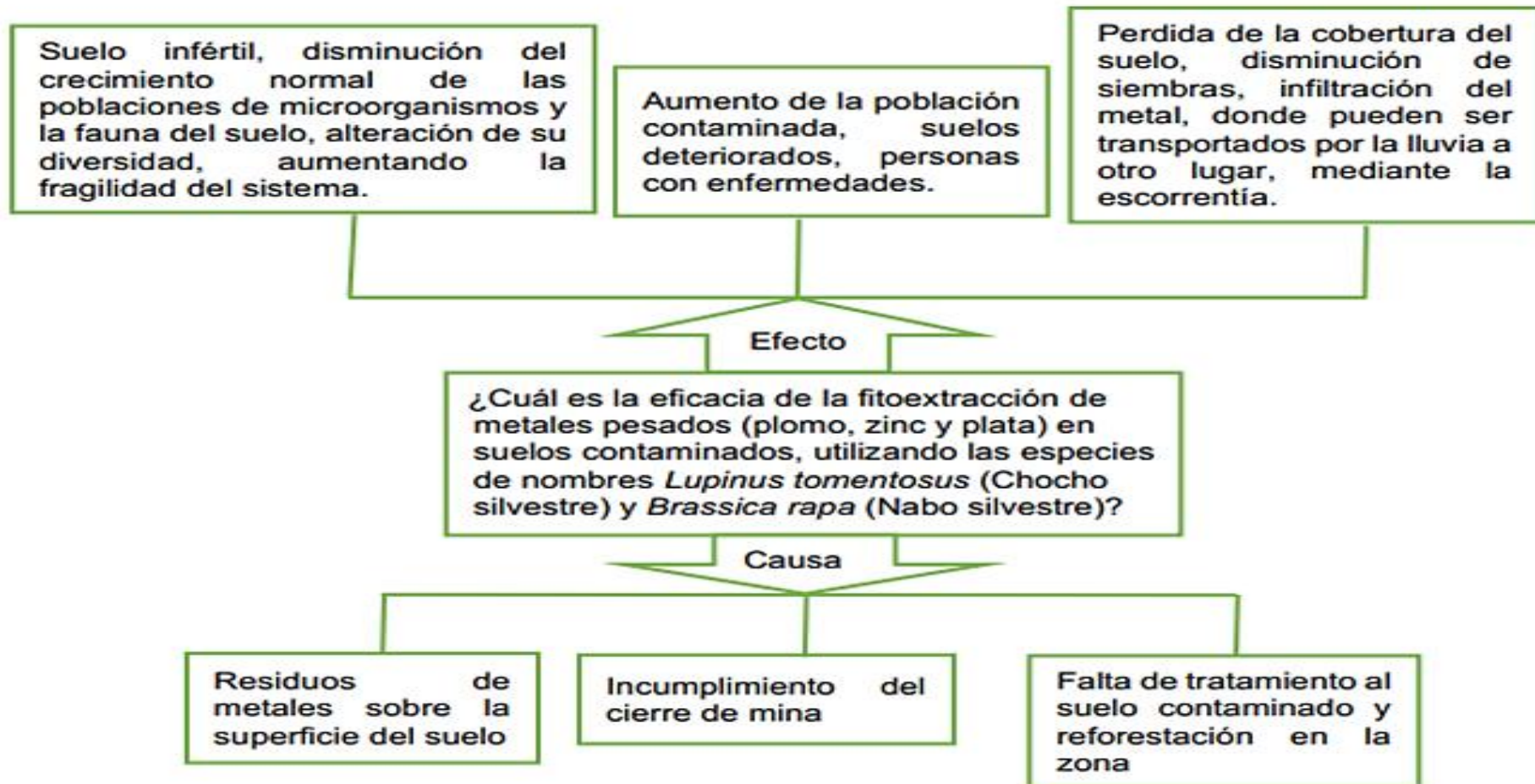


Distribución:

Fac. de Ingeniería - PAIA - Exp. Graduando - Interesado - Archivo.
BCR/EJ/ML/nto.

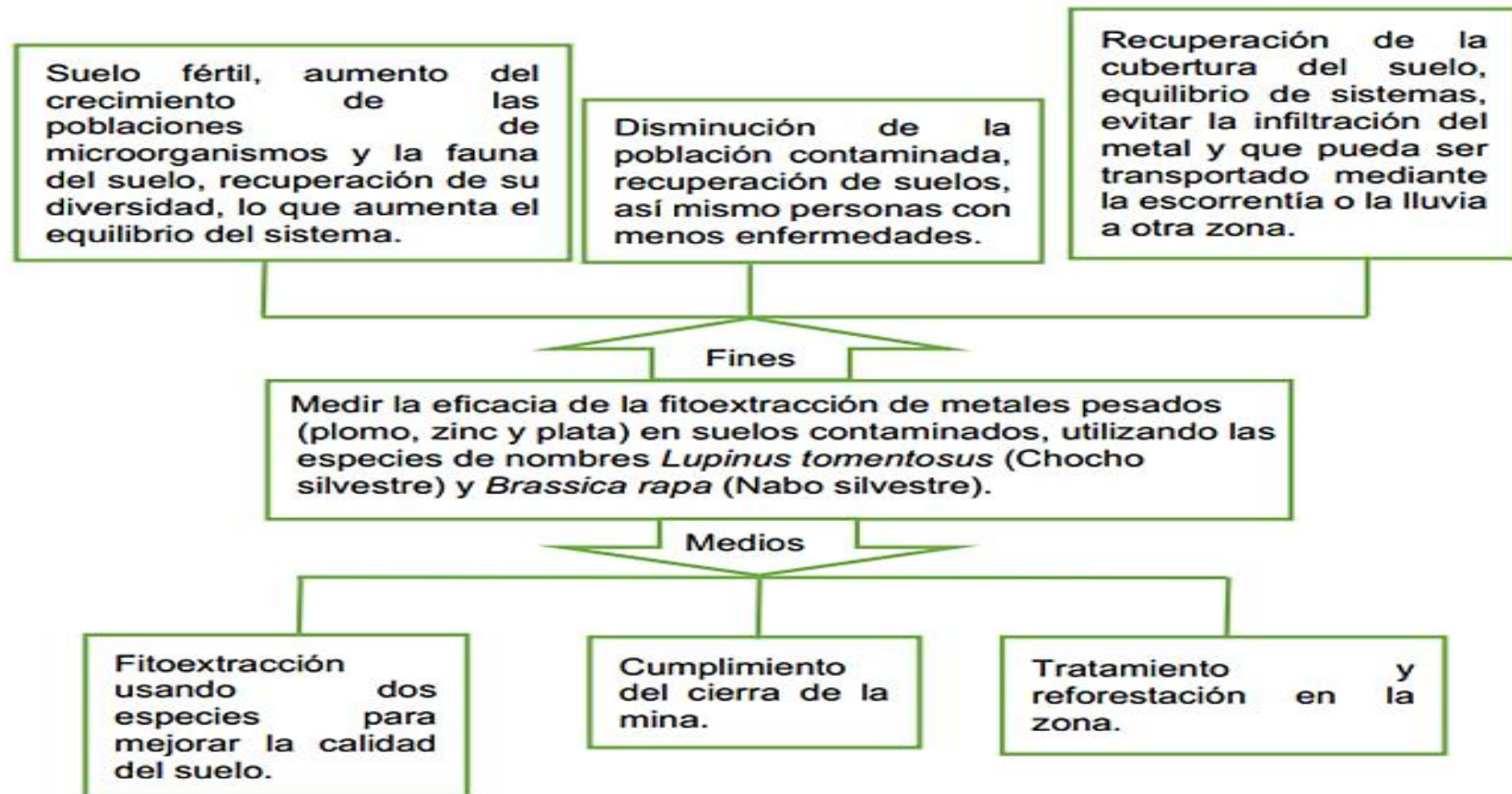
ANEXO 4

DIAGRAMA DE CAUSA Y EFECTO



ANEXO 5

DIAGRAMA DE MEDIOS Y FINES



ANEXOS 6

FORMATO DATOS LONGITUDINALES REGISTRADOS EN CAMPO

M	Tratamiento 1			Tratamiento 2			Tratamiento 3					
	Chocho			Nabo			Chocho			Nabo		
	Antes	Des.	Dif.	Antes	Des.	Dif.	Antes	Des.	Dif.	Antes	Des.	Dif.
	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)
M1	8	10	2	13	15	2	9	9	0	13	14	1
M2	18	25	7	26	30	4	19	19	0	26	29	3
M3	28	39	11	66	75	9	29	29	0	66	70	4
M4	38	52	14	90	120	30	39	39	0	90	110	20
M5	50	68	18	130	175	45	53	57	4	130	160	30
M6	6	10	4	12	14	2	8	9	1	12	14	2
M7	11	22	11	25	29	4	18	19	1	27	29	2
M8	16	33	17	55	70	15	28	29	1	65	70	5
M9	23	45	22	85	110	25	38	39	1	90	100	10
M10	34	62	28	120	160	40	50	53	3	131	140	9
M11	6	11	5	13	14	1	8	9	1	13	14	1
M12	11	25	14	26	29	3	18	19	1	26	29	3
M13	16	39	23	66	70	4	28	29	1	66	70	4
M14	25	55	30	90	110	20	38	39	1	90	110	20
M15	33	70	37	130	160	30	50	53	3	130	150	20
M16	8	8	0	12	14	2	8	9	1	12	14	2

M17	18	19	1	25	29	4	18	19	1	25	29	4
M18	28	29	1	55	70	15	28	29	1	55	70	15
M19	38	39	1	85	110	25	38	39	1	85	110	25
M20	50	55	5	120	160	40	50	53	3	120	150	30
M21	6	8	2	12	12	0	8	9	1	12	14	2
M22	11	18	7	25	25	0	18	19	1	27	29	2
M23	16	29	13	50	55	5	28	29	1	65	70	5
M24	25	37	12	80	85	5	38	39	1	90	100	10
M25	33	49	16	120	120	0	50	53	3	131	140	9
Prom.	22.24	34.28	12.04	61.24	74.44	13.20	28.68	29.96	1.28	63.88	73.40	9.52

ANEXOS 7

RESULTADO DE LA MUESTRA INICIAL ENVIADOS A LABORATORIO (ANTES DE LA INTERVENCIÓN FITOEXTRACTORA)

LABORATORIO ANÁLISIS QUÍMICO - INFORME DE ANALISIS N° 232-11-2023



RUC N° 20573116900

QUIMBOL CHEMICAL S.A.C

Cel. 951 854 687

Laboratorio Químico.

R. Acreditación 17025

A SOLICITUD DE : Antonella Betzabe, OSORIO YACOLCA
REFERENCIA : TESIS- EFICACIA DE LA EXTRACCIÓN DE METALES PESADOS EN SUELOS CONTAMINADOS
: UTILIZANDO LAS ESPECIES DE CHOCHO SILVESTRE (*Lupinus tomentosus*) y NABO SILVESTRE (*Brassica rapa*)
: EN LA PROVINCIA DE PASCO
GUÍA DE REMISION :
FECHA DE RECEPCION : 13/11/2023
HORA DE ENTREGA : 13:12 HRS
LUGAR DE RECEPCION : Huariaca - Cerro de Pasco
FECHA DE REPORTE : 19/11/2023 CANTIDAD DE MUESTRAS : 2
TIPO DE MUESTRA : Materia Orgánica y suelo DESCRIPCION MUESTRAS : Muestras Orgánicas y suelos
HORA DE REPORTE : 23:33:12 TIPO DE ANALISIS : Químico total
CONTRAMUESTRAS : Si

ID. INTERNO	Codigo Cliente	Ag (Oz/tm)	Bo (ppm)	Pb (ppm)	Zn (ppm)	Cu (ppm)	Fe (ppm)	Mn (ppm)	ppm As
LQC -MIN - 0578	Muestra 1	0.675	100.00	300.00	500.00	100.00	18000.00	9500.00	< 100
LQC -MIN - 0579	Muestra 2	2.106	300.00	17400.00	21900.00	1500.00	94500.00	10500.00	200.00

ID. INTERNO	Codigo Cliente	CONDUCTIVIDAD (ds/m)	pH	Sales Totales (ppm)	CE. (ds/m)	Ca (ppm)	Mg (ppm)	Na (ppm)
LQC -MIN - 0578	Muestra 1	*	6.12	2674	3.55	45	75	523
LQC -MIN - 0579	Muestra 2	*	5.12	2456	4.02	32	72	455

ESQUEMA
QC-MI-034-Au-N Cu, Pb, Zn, Ag y As por (AA);
Reconocimiento Absorción Atómica

Emitido en Cerro de Pasco - Peru

26/05/2024


Ing. David Lopez Garcia
Jefe de Laboratorio Químico
CIP. 129126

ANEXOS 8

RESULTADO DE LA MUESTRA ENVIADOS A LABORATORIO (DESPUÉS DE LA INTERVENCIÓN FITOEXTRACTORA).



RUC N° 20573116900

QUIMBOL CHEMICAL S.A.C

Cel. 951 854 667

Laboratorio Químico.

R. Accreditation 17025

A SOLICITUD DE : Antonella Betzabe, OSORIO YACOLCA
 REFERENCIA : TESIS- EFICACIA DE LA EXTRACCIÓN DE METALES PESADOS EN SUELOS CONTAMINADOS
 : UTILIZANDO LAS ESPECIES DE CHOCHO SILVESTRE (*Lupinus tomentosus*) y NABO SILVESTRE (*Brassica rapa*)
 : EN LA PROVINCIA DE PASCO
 :
 GUIA DE REMISION :
 FECHA DE RECEPCION : 15/05/2024
 HORA DE ENTREGA : 13:12 HRS
 LUGAR DE RECEPCION : Huariaca - Cerro de Pasco
 FECHA DE REPORTE : 26/05/2024
 TIPO DE MUESTRA : Materia Orgánica y suelo
 HORA DE REPORTE : 21:49:16
 CONTRAMUESTRAS : SI

CANTIDAD DE MUESTRAS : 24
 DESCRIPCION MUESTRAS : Muestras Orgánicas y suelos
 TIPO DE ANALISIS : Químico total

ID. INTERNO	Codigo Cliente	CONDUCTIVIDAD (ds/m)	pH	Pb (ppm)	Zn (ppm)	Cu (ppm)	Fe (ppm)	% Mn	% As
LQC -MIN - 02688	Materia Orgánica Grupo 1 M-01	*	*	166.41	554.03	41.11	749.804	-	-
LQC -MIN - 02689	Materia Orgánica Grupo 1 M-02	*	*	94.15	214.97	31.38	315.393	-	-
LQC -MIN - 02690	Materia Orgánica Grupo 1 M-03	*	*	77.13	262.24	23.14	136.907	-	-
LQC -MIN - 02691	Materia Orgánica Grupo 1 M-04	*	*	70.60	280.59	18.10	237.147	-	-
LQC -MIN - 02692	Materia Orgánica Grupo 2 M-01	*	*	109.47	339.13	25.76	371.324	-	-
LQC -MIN - 02693	Materia Orgánica Grupo 2 M-02	*	*	127.55	218.92	22.84	251.285	-	-
LQC -MIN - 02694	Materia Orgánica Grupo 2 M-03	*	*	83.48	250.44	22.13	298.971	-	-
LQC -MIN - 02695	Materia Orgánica Grupo 2 M-04	*	*	161.03	476.50	29.58	985.869	-	-
LQC -MIN - 02696	Materia Orgánica Grupo 3 M-01	*	*	56.14	203.87	13.30	153.642	-	-
LQC -MIN - 02697	Materia Orgánica Grupo 3 M-02	*	*	69.49	217.65	15.73	565.098	-	-
LQC -MIN - 02698	Materia Orgánica Grupo 3 M-03	*	*	68.11	258.82	4.54	473.740	-	-
LQC -MIN - 02699	Materia Orgánica Grupo 3 M-04	*	*	34.24	180.73	1.59	78.025	-	-
LQC -MIN - 02700	Suelo Grupo 1 M-01	2.12	7.65	4867.63	8908.50	49.29	14194.148	-	-
LQC -MIN - 02701	Suelo Grupo 1 M-02	2.28	7.71	1457.12	2582.85	48.73	11427.875	-	-
LQC -MIN - 02702	Suelo Grupo 1 M-03	2.38	7.83	3947.11	4600.80	44.91	12115.768	-	-
LQC -MIN - 02703	Suelo Grupo 1 M-04	2.26	8.00	2538.83	4694.17	67.96	12000.000	-	-
LQC -MIN - 02704	Suelo Grupo 2 M-01	2.24	8.20	4513.50	8359.65	96.79	13596.536	-	-
LQC -MIN - 02705	Suelo Grupo 2 M-02	2.25	8.07	2313.08	4112.15	51.40	11088.785	-	-
LQC -MIN - 02706	Suelo Grupo 2 M-03	2.12	7.94	3648.22	6329.28	85.47	12073.774	-	-
LQC -MIN - 02707	Suelo Grupo 2 M-04	2.21	8.03	3561.46	6145.88	189.10	11999.100	-	-
LQC -MIN - 02708	Suelo Grupo 3 M-01	2.49	8.31	1292.45	2721.70	136.79	9306.604	-	-
LQC -MIN - 02709	Suelo Grupo 3 M-02	2.42	8.23	2124.38	3567.16	139.30	10706.468	-	-
LQC -MIN - 02710	Suelo Grupo 3 M-03	2.48	8.34	2541.744	4471.243	92.76	13506.494		
LQC -MIN - 02711	Suelo Grupo 3 M-04	2.33	8.43	3278.313	6327.373	105.46	12315.452		
LQC -MIN - 02712	DUP (Suelo GRUPO 2 M-03)	2.18	7.92	3608.673	6355.188	87.76	12927.207		

ESQUEMA

QC-MI-034-Au-N Cu, Pb, Zn, Ag y As por (AA);

Reconocimiento Absorción Atómica

Emitido en Cerro de Pasco - Peru

26/05/2024


 Ing. David Lopez Garcia
 Jefe de Laboratorio Químico
 CIP. 129126



RUC N° 20573116900

QUIMBOL CHEMICAL S.A.C

Cel. 951 854 667

Laboratorio Químico.

R. Accreditation 17025

A SOLICITUD DE : Antonella Betsabe OSORIO YACOLCA
 REFERENCIA : EFICACIA DE LA FITOEXTRACCION DE METALES PESADOS EN SUELOS CONTAMINADOS
 UTILIZANDO LAS ESPECIES DE CHOCHO SILVESTRE (LUPINUS TORMENTOSUS) Y NABO SILVESTRE
 LUGAR DEL ESTUDIO : PROVINCIA DE PASCO
 GUIA DE REMISION : N° 013044
 FECHA DE RECEPCION : 12/06/2024
 HORA DE ENTREGA : 13:12 HRS
 LUGAR DE RECEPCION : Huariaca - Cerro de Pasco
 FECHA DE REPORTE : 13/06/2024 CANTIDAD DE MUESTRAS : 25
 TIPO DE MUESTRA : Suelo y MO DESCRIPCION MUESTRAS : Muestras suelo y MO
 HORA DE REPORTE : 16:15:41 TIPO DE ANALISIS : Químico total
 CONTRAMUESTRAS : SI

ID. INTERNO	Codigo Cliente	% As	Ag (ppm)	Pb (ppm)	Zn (ppm)	% Cu	% Fe
LQC -MIN - 03575	Grupo 1 M-01	-	4.699	166.406	554.033	-	-
LQC -MIN - 03576	Grupo 1 M-02	-	1.098	94.147	214.969	-	-
LQC -MIN - 03577	Grupo 1 M-03	-	1.350	77.131	262.245	-	-
LQC -MIN - 03578	Grupo 1 M-04	-	3.983	70.601	280.594	-	-
LQC -MIN - 03579	Grupo 2 M-01	-	2.361	109.466	339.129	-	-
LQC -MIN - 03580	Grupo 2 M-02	-	2.475	127.546	218.923	-	-
LQC -MIN - 03581	Grupo 2 M-03	-	2.136	83.479	250.437	-	-
LQC -MIN - 03582	Grupo 2 M-04	-	3.943	161.025	476.503	-	-
LQC -MIN - 03583	Grupo 3 M-01	-	3.693	56.138	203.871	-	-
LQC -MIN - 03584	Grupo 3 M-02	-	2.622	69.490	217.648	-	-
LQC -MIN - 03585	Grupo 3 M-03	-	2.270	68.110	258.816	-	-
LQC -MIN - 03586	Grupo 3 M-04	-	1.433	34.236	180.732	-	-
LQC -MIN - 03587	Grupo 1 M-01	-	14.399	4867.627	8908.500	-	-
LQC -MIN - 03588	Grupo 1 M-02	-	5.361	1457.115	2582.846	-	-
LQC -MIN - 03589	Grupo 1 M-03	-	3.992	3947.106	4600.798	-	-
LQC -MIN - 03590	Grupo 1 M-04	-	6.796	2538.835	4694.175	-	-
LQC -MIN - 03591	Grupo 2 M-01	-	10.698	4513.500	8359.654	-	-
LQC -MIN - 03592	Grupo 2 M-02	-	6.075	2313.084	4112.150	-	-
LQC -MIN - 03593	Grupo 2 M-03	-	6.748	3648.223	6329.285	-	-
LQC -MIN - 03594	Grupo 2 M-04	-	8.104	3561.459	6145.880	-	-
LQC -MIN - 03595	Grupo 3 M-01	-	4.245	1292.453	2721.698	-	-
LQC -MIN - 03596	Grupo 3 M-02	-	5.473	2124.378	3567.164	-	-
LQC -MIN - 03597	Grupo 3 M-03	-	3.711	2541.744	4471.243	-	-
LQC -MIN - 03598	Grupo 3 M-04	-	8.712	3278.313	6327.373	-	-
LQC -MIN - 03599	DUP (GRUPO 2 M-03)	-	6.711	3608.673	6355.188	-	-

ANEXOS 9

PANEL FOTOGRÁFICO

Imagen 1: Instalación del Brassica rapa (Nabo silvestre) a las camas de cría, en la fecha 03/01/2024.



Imagen 2: Instalación del Lupinus tomentosus (Chocho silvestre) a las camas de cría, en la fecha 03/01/2024.



Imagen 3: Medición longitudinal (altura) del *Brassica rapa* (Nabo silvestre) después de cuatro meses y medio.



Imagen 4: Medición longitudinal (altura) del *Lupinus tomentosus* (Chocho silvestre) después de cuatro meses y medio.



Imagen 5: Visita del jurado Mg. Frank Cámara Llanos al área experimental en la fecha 05/05/2024.



Imagen 6: Visita del jurado Mg. Jorge Romero Estacio al área experimental en la fecha 19/03/2024.



Imagen 7: Visita del jurado Mg. Sarita Deniz Prado Valenzuela, al área experimental en la fecha 04/05/2024.



Imagen 8: Visita del asesor Mg. Joel Gamez Penadillo, al área experimental en la fecha 11/02

