UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LOS ANDES

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y RECURSOS NATURALES

Tesis

Capacidad fitorremediadora del tarwi (*Lupinus mutabilis Sweet*) en suelos contaminados con cobre por residuos mineros del sector de Antilla, distrito de Sabaino, provincia de Antabamba – Apurímac, 2023.

Asesor:

Dra. Soto Carrión, Carolina

Autor:

Durán Gonzales, Sheila Paola

Para optar el Título Profesional:

Ingeniero Ambiental

Abancay- Apurímac – Perú

2024

ACTA DE TITULO N°. 0005-2024-UTEA-FI-EPIARN

Reunidos los Jurados constituidos por los señores Docentes:

*	**Mg. Kristhel Jaylane Calderón Aedo**	**PRESIDENTA.**
*	**Mg. Elena Elvira Gonzalez Mamani**	**DICTAMINANTE.**
*	**Ing. Waldir Pimentel Maldonado**	**REPLICANTE**

La postulante al **TITULO PROFESIONAL DE INGENIERO AMBIENTAL**

Don (ña): **DURAN GONZALES SHEILA PAOLA;** ha cumplido con las exigencias del Reglamento General de Grado Académico y Título de la Universidad Tecnológica de los Andes.

MODALIDAD DE (*) **SUSTENTACIÓN DE TESIS.**

INTITULADA: **Capacidad fitorremediadora del tarwi (lupinus mutabilis sweet) en suelos contaminados con cobre por residuos mineros del sector de Antilla, distrito de Sabaino, provincia de Antabamba – Apurimac, 2023.**

Habiendo aprobado con la nota de: **TRECE (13).**

Se extiende el Acta, conforme al Libro de Actas de Sustentación de Tesis, folio(s) N° 133 y 136.

Abancay, 01 de Agosto del 2024.

.....
Mg. Kristhel Jaylane Calderón Aedo
PRESIDENTA

.....
Mg. Elena Elvira Gonzalez Mamani
DICTAMINANTE

.....
Mg. Waldir Pimentel Maldonado
REPLICANTE

Capacidad fitorremediadora del tarwi (Lupinus mutabilis Sweet) en suelos contaminados con cobre por residuos mineros del sector de Antilla, distrito de Sabaino, provincia de Antabamba – Apurímac, 2023

INFORME DE ORIGINALIDAD

18%	18%	4%	5%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	hdl.handle.net Fuente de Internet	3%
2	repositorio.ucv.edu.pe Fuente de Internet	2%
3	repositorio.utea.edu.pe Fuente de Internet	1%
4	www.minem.gob.pe Fuente de Internet	1%
5	repositorio.unam.edu.pe Fuente de Internet	1%
6	Submitted to Universidad Tecnologica de los Andes Trabajo del estudiante	1%
7	repositorio.upn.edu.pe Fuente de Internet	<1%

Metadatos

Datos del Autor		
Apellidos y nombres	:	Durán Gonzales, Sheila Paola
Tipo de documento de Identidad	:	DNI
Número de Documento de Identidad	:	73014014
URL ORCID	:	
Datos del Asesor		
Apellidos y nombres	:	Dra. Soto Carrión, Carolina
Tipo de documento de Identidad	:	DNI
Número de Documento de Identidad	:	31011917
URL ORCID	:	https://orcid.org/0000-0001-5200-5768
Datos de la Investigación		
Facultad	:	Ingeniería
Escuela Profesional	:	Ing. Ambiental y Recursos Naturales
Línea de Investigación	:	Calidad Ambiental
Rango de años en que se realizó la Investigación	:	Noviembre 2022 – setiembre 2023
Fuente de Financiamiento	:	Cofinanciado
Porcentaje de similitud	:	18 %
URL de OCDE	:	https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.07.01

DEDICATORIA

La presente investigación es consagrada especialmente a mi progenitora Santosa Gonzales Ignacio, quien a lo largo de mi vida asistió por mi bienestar y formación, brindándome protección y fortaleza, por tu incondicional apoyo, me enseñaste a levantarme cada vez que me caigo. A Santiago Huasacca Condori, por tu incondicional apoyo y tu confianza, ahora sé que estas acompañándome desde el cielo y estoy segura de que te sentirás orgulloso de mí.

A Dios por, estar presente cuando más lo necesité durante la ejecución del proyecto de investigación.

AGRADECIMIENTO

Previo a todo, quiero expresar mi agradecimiento a la UNIVERSIDAD TECNOLOGICA DE LOS ANDES (UTEA), institución de educación superior, que ha proporcionado la oportunidad de avanzar en el desarrollo profesional.

Agradezco a Dios por su presencia en todo momento y así lograr mis propósitos.

A la asesora de tesis Dra. Carolina Soto Carrión, gracias a su soporte incondicional, por participar durante la elaboración del presente proyecto de investigación, así mismo contribuir conocimiento y experiencia, concluyendo con éxito.

A mi madre, por estar perennemente conmigo, por el amor y dedicación brindada durante este tiempo. A Santiago y a mis perritos amados que han dejado este mundo pero que siempre están conmigo en mi corazón.

RESUMEN

Las actividades mineras en etapa de exploración producen contaminación a causa de residuos minerales presentes en el suelo, por ello se están aplicando enfoques biotecnológicos como la fitorremediación. El propósito de este estudio fue evaluar la capacidad fitorremediadora del tarwi (*Lupinus mutabilis sweet*), en suelos contaminados con cobre por residuos mineros, en un tiempo de 03 meses, observándose la concentración de cobre en la estructura vegetativa del tarwi.

El estudio se realizó in situ, empleando el diseño experimental, llevando a cabo un análisis inicial y final. Los ensayos se realizaron en 9 maceteros, 08 maceteros para el suelo contaminado y 01 que fue el suelo control. Los análisis realizados determinaron que 4 de las plantas lograron resistir y completar el periodo de exposición, atribuyéndose las pérdidas al exceso de cobre. La concentración de cobre se cuantifico en raíces, tallos y hojas al final mediante espectrofotometría, obteniéndose los valores más altos en la muestra Tw-01 (634,67mg/Kg en raíz), Tw-06 (622mg/Kg en hojas) y Tw-04 (486,26mg/kg en tallos). Asimismo, se evidencio la reducción de las concentraciones iniciales (1288mg/Kg en MS-04) y finales (346mg/Kg) de cobre en el suelo luego del tratamiento fitorremediador. Los efectos físicos sobre la morfología de la planta también demostraron cambios atribuibles a la fitorremediación del cobre.

En conclusión, los resultados soportan la capacidad del tarwi (*Lupinus mutabilis Sweet*) tanto para resistir como para concentrar cobre en la estructura vegetativa, constituyendo una alternativa viable para la descontaminación de suelos con cobre por residuos mineros.

Palabras clave: Fitorremediación, tarwi, cobre, capacidad, concentración.

ABSTRACT

Mining activities at the exploration stage produce contamination from mineral waste present in the soil. Therefore, biotechnological approaches such as phytoremediation are being applied. The purpose of this study was to evaluate the phytoremediating capacity of tarwi (*Lupinus mutabilis Sweet*) in soils contaminated with copper from mining waste over a period of 3 months, with concentrations of copper in the tarwi plant structure observed.

The study was carried out in situ, employing an experimental design with initial and final analysis. Tests were carried out on 9 pots, 8 containing contaminated soil and 1 as the control soil. The analysis determined that 4 of the plants managed to resist and survive the entire period of exposure; losses were attributed to copper excess. Concentrations of copper were quantified in roots, stems and leaves at the end by spectrophotometry, obtaining the highest values in sample Tw-01 (634.67 mg/Kg in roots), Tw-06 (622 mg/Kg in leaves) and Tw-04 (486.26 mg/Kg in stems). Reductions in the initial (1,288 mg/kg in MS-04) and final (346 mg/Kg) concentrations of copper were also evidenced after phytoremediation treatment. Physical effects on plant morphology also showed attributable changes to copper phytoextraction.

In conclusion, the results support the capacity of tarwi (*Lupinus mutabilis Sweet*) either to resist and concentrate copper in the plant structure, constituting a viable alternative for decontaminating soils contaminated by mining copper waste.

Keywords: Phytoremediation, tarwi, copper, capacity, concentration.

ÍNDICE DE GENERAL

Portada……..…..i

Acta de sustentación…….....ii

Reporte de similitud……iii

Metadatos……..iv

Dedicatoria……..……v

Agradecimiento..... vi

Resumen…….....vii

Abstract……...viii

Índice general..... ix

Índice de Tablas……..xii

Índice de figuras. ..... …xiii

Índice de anexos……xiv

Acrónimos……..…...xv

I. INTRODUCCIÓN 16

II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....17

2.1. Descripción y formulación del problema 17

2.1.1. Formulación del problema 20

2.1.2. Problema general 20

2.1.3. Problemas específicos.....20

2.2. Objetivos.....21

2.3. Justificación de la investigación.....22

2.4. Hipótesis 23

2.4.1. Hipótesis general.....23

2.4.2. Hipótesis específicas 23

2.5. Variables.....24

III. MARCO TEÓRICO.....25

3.1. Antecedentes 25

3.1.1. A nivel internacional.....25

3.1.2. A nivel nacional....26
3.1.3. A nivel regional y local....29
3.2. Bases teóricas....29
3.2.1. Fitorremediación....29
3.2.2. Acumulación de metales pesados en las plantas....29
3.2.3. Generalidades del tarwi (Lupinus mutabilis Sweet)....30
3.2.4. Suelo....35
3.2.5. Propiedades químicas del suelo....36
3.2.6. Contaminación de suelo....37
3.2.7. Metales pesados....37
3.2.8. Marco Legal....39
3.3. Definición de términos....41
IV. METODOLOGÍA....43
4.1. Tipo y nivel de investigación....43
4.1.1. Tipo de investigación....43
4.1.2. Nivel de investigación....43
4.2. Ámbito temporal y espacial....43
4.2.1. Ámbito temporal....43
4.2.2. Ámbito espacial....44
4.3. Población y muestra....44
4.3.1. Población....44
4.3.2. Muestra....44
4.4. Instrumentos....44
4.5. Procedimientos....46
4.5.1. Preparación del entorno experimental....46
4.5.2. Muestreo de suelos contaminados con cobre para el tratamiento....47
4.6. Análisis de datos....53
4.7. Consideraciones éticas....54

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN....56
5.1. Resultados....56
5.1.1. Concentración de cobre en el suelo....56
5.1.2. pH del suelo....58
5.1.3. Conductividad Eléctrica (CE) del suelo....60
5.1.4. Temperatura (°C)....62
5.1.5. Concentración de cobre en hojas de tarwi....63
5.1.6. Concentración de cobre en raíces de tarwi....65
5.1.7. Concentración de cobre en el tallo de tarwi....66
5.1.8. Cantidad de hojas del tarwi....68
5.1.9. Tamaño del tarwi....69
5.2. Discusión de resultados....71
5.3. Prueba de hipótesis....72
5.3.1. Prueba de hipótesis general....72
5.3.2. Prueba de hipótesis especifica....73
VI.CONCLUSIONES....79
VII.RECOMENDACIONES....81
VIII.REFERENCIAS....82
WEB GRAFIA....89
IX.ANEXOS....91

ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla 1Tabla de variable…… 24

Tabla 2 Clasificación de la salinidad de los suelos según la conductividad eléctrica.....37

Tabla 3 Parámetros para la concentración de cobre en el suelo (mg/kg). 40

Tabla 4 Estándares de calidad ambiental para suelo según Canadian Soil Quality Guidelines.....40

Tabla 5 Técnicas e instrumentos de recolección de datos. 45

Tabla 6 Localización de puntos de recolección de muestras de suelo. 48

Tabla 7Concentración de cobre en el suelo. 57

Tabla 8 pH del suelo. 59

Tabla 9 Conductividad eléctrica (CE) del suelo. 61

Tabla 10 Concentración de cobre en hojas de tarwi. 64

Tabla 11Concentración de cobre en raíces de tarwi. 65

Tabla 12Concentración de cobre en el tallo de tarwi. 67

Tabla 13Cantidad de hojas del tarwi. 68

Tabla 14Tamaño del tarwi 70

Tabla 15 Pruebas estadísticas sobre la concentración de cobre en suelos contaminados. 73

Tabla 16 Pruebas estadísticas sobre los parámetros químicos del suelo.....74

Tabla 17 Pruebas estadísticas sobre la concentración de cobre en la estructura vegetativa del tarwi (Lupinus mutabilis Sweet). 76

Tabla 18 Resumen de las pruebas estadísticas sobre cambios físicos en la estructura vegetativa del tarwi (Lupinus mutabilis Sweet). 77

Tabla 19 Matriz de consistencia. 91

Tabla 20 Instrumento de recolección de información. 93

ÍNDICE DE FIGURAS.

Figura 1 Planta de tarwi (*Lupinus mutabilis Sweet*).....31

Figura 2 Distribución geográfica del tarwi. 32

Figura 3 Raíz del tarwi. 32

Figura 4 Hojas de tarwi. 33

Figura 5 Colores y formas de semilla de tarwi.....34

Figura 6 Escala del valor pH. 36

Figura 7 Mapa de muestreo de suelo para el desarrollo de la fitorremediación. 48

Figura 8 Técnica de cuarteto. 49

Figura 9 Maceta para el desarrollo de la fitorremediación. 51

Figura 10 Concentración de cobre en el suelo. 56

Figura 11 pH del suelo. 58

Figura 12 Conductividad Eléctrica (CE) del suelo. 60

Figura 13 Temperatura (°C).....62

Figura 14 Concentración de cobre en hojas de tarwi. 63

Figura 15 Concentración de cobre en raíces de tarwi. 65

Figura 16 Concentración de cobre en el tallo de tarwi.....66

Figura 17 Cantidad de hojas del tarwi. 68

Figura 18 Tamaño del tarwi. 69

Figura 19 Materiales para la construcción del invernadero en el sector de Antilla.....97

Figura 20 Área donde se construirá el invernadero. 97

Figura 21 Construcción del invernadero.....98

Figura 22 Toma de temperatura para almacigar las semillas de tarwi. 98

Figura 23 Observación y toma de temperatura de los almácigos. 99

Figura 24 Traspaso de los germinados a los maceteros. 99

Figura 25 Vista del área contaminada por residuos mineros. 100

Figura 26 Poblador orientando al lugar de donde se tomó las muestras de suelos. 100

Figura 27 Observación del área donde se tomó las muestras de suelo. 101

Figura 28 Toma de muestras del suelo contaminado. 102
Figura 29 Trasplante de las plántulas de tarwi al suelo contaminado. 102
Figura 30 Observación de las plántulas de tarwi después del trasplante al suelo contaminado con cobre. 103
Figura 31 Observación de las plántulas después de tres meses de experimentación. ... 103
Figura 32 Extracción de las plántulas de tarwi del suelo contaminado con cobre. 104
Figura 33 Muestras de suelo final contaminado. 104
Figura 34 Toma de medidas de las plantas extraídas. 105
Figura 35 Separación de hojas, tallos y raíces. 105
Figura 36 Análisis de pH del suelo contaminado con cobre inicial y final. 106
Figura 37 Análisis de CE. del suelo contaminado con cobre inicial y final. 106

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 01. Matriz de consistencia 91
ANEXO 02. Instrumento de recolección de información 93
ANEXO 03. Base de datos 94
ANEXO 04. Evidencias 97

ACRÓNIMOS.

CE: Conductividad Eléctrica

Cu: cobre

FAO: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura

INGEMMET: Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico

Kg: Kilogramos

Mg: miligramos

MINAM: Ministerio del Ambiente

MINEM: Ministerio de Energía y Minas

MS: Muestra Suelo

OEFA: Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental

OSINERGMIN: Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería

PAMs: Pasivos Ambientales Mineros

pH: Potencial de Hidrógeno

Tw: Tarwi

I. INTRODUCCIÓN

La industria minera, en su fase de exploración, conlleva la generación de contaminantes derivados de los residuos minerales depositados en el suelo. Esta problemática ambiental ha impulsado la búsqueda de soluciones afectivas, siendo los enfoques biotecnológicos una vanguardia en este campo. Entre estas innovaciones, la fitorremediación emerge como una alternativa prometedora. En este contexto, el presente estudio se propone evaluar la capacidad fitorremediadora del tarwi (*Lupinus mutabilis Sweet*) en suelos contaminados con cobre, como consecuencia de la actividad minera.

La fitorremediación, basada en la capacidad de ciertas plantas para absorber, acumular y metabolizar contaminantes, se posiciona como una estrategia sostenible y respetuosa con el medio ambiente. El tarwi, una leguminosa de notables propiedades biológicas, se presenta como una opción atractiva para abordar la problemática de la contaminación por cobre en suelos mineros.

Esta investigación no solo busca entender la eficacia del tarwi en la fitorremediación, sino también contribuir al conocimiento científico sobre como las plantas pueden desempeñar un papel crucial en la rehabilitación de suelos afectados por la actividad minera. A través de la evaluación sistemática de parámetros clave, se pretende obtener información valiosa que respalde la implementación de prácticas sostenibles en la gestión de suelos contaminados.

El análisis de la capacidad fitorremediadora del tarwi no solo proporcionará perspectivas científicas, sino que también podría tener implicaciones prácticas importantes en la mitigación de la contaminación del suelo en áreas afectadas por la minería. En última instancia, esta investigación aspira a ofrecer una contribución significativa al desarrollo de estrategias ambientalmente responsables para la gestión de suelos contaminados, promoviendo así la coexistencia armoniosa entre la actividad minera y la preservación del entorno natural.

II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1. Descripción y formulación del problema

El suelo constituye un manto superficial esencial de la superficie de la tierra, compuesta por una composición de minerales, materia orgánica, agua, aire y organismos vivos. Desempeña un papel vital en la agricultura y producción de alimentos ya que es la fuente principal de nutrientes para el crecimiento de cultivos, así mismo garantiza el bienestar de la vida en nuestro planeta de manera sostenible (FAO, 2018).

Por otro lado, el suelo es un recurso limitado y vulnerable que puede verse afectado por actividades antropogénicas como la industria minera, y otros procesos industriales que causan un impacto al ambiente (Bettaieb, T. & Arbaoui, S., 2018).

La mineria ha generado gran preocupacion a nivel global debido a los graves impactos ambientales y en la salud publica derivados de prácticas inadecuadas durante sus operaciones. En diversos países, la evidencia muestra severos daños a la tierra y el agua: desde la alteracion de la corteza terrestre y la contaminación hídrica, hasta la destruccion de flora, fauna y sus hábitats. Las comunidades cuyos asentamientos rodean las zonas mineras resultan especialmente afectadas: sus integrantes exhiben deterioro de condiciones y calidad de vida por la exposición a sustancias nocivas liberadas por dichas actividades extractivas (Villon, 2023).

En el mundo y en América Latina, la minería peruana ocupa posiciones importantes, por su potencial y producción de minerales, contribuyendo al crecimiento del país, siendo un origen importante de ingresos económicos (Gamarra, 2018).

La encuesta mundial “Mineral Commodity Summaries 2020” del Servicio Geológico de los Estados Unidos (U.S.Geological Survey - USGS), indicó que a nivel mundial durante el 2019 el Perú se encontró como el segundo productor mundial de cobre (Minero, 2020).

Perú forma parte de una región latinoamericana rica en recursos naturales, pero ello se vio afectado por la extracción excesiva de minerales llevada a cabo por de empresas orientadas a la exportación, a parte de contribuir significativamente al desarrollo de las economias locales, han causado problemas sociales y ambientales en diversos departamentos del Perú (Rosado, et al., 2023).

Si bien la mineria ha sido un motor económico clave en el Perú, esta actividad extractiva tiene un lado oscuro visible en numerosos sitios abandonados sin remediación a lo largo del territorio nacional. La falta de acciones integrales de cierre y rehabilitación ambiental en estas áreas han propiciado la aparición de los llamados Pasivos Ambientales Mineros (PAMs): espacios contaminados por acumulaciones de residuos mineros de diversa índoles, los cuales representan graves riesgos tanto para los frágiles ecosistemas circundantes como para las poblaciones cercanas (Chappuis, 2019).

A nivel nacional, Apurímac ocupa el tercer lugar en producción de cobre (INGEMMET, 2022). La ultima actualización del geoportal de CooperAcción (2022), da cuenta de la evolucion reciente de las concesiones mineras en el Perú. Son 06 las regiones donde las concesiones mineras ocupan más del 40% de su territorio: Apurímac ocupa el 49.59% de su territorio, siendo la region con mayor porcentaje de concesiones territoriales (CooperAcción, 2022).

Según datos del Ministerio de Energía y Minas (MINEM), el departamento Apurímac sobresale como una de las regiones más afectadas por la acumulación de desechos mineros abandonados, también conocidos como Pasivos Ambientales Mineros (PAMs). Esta circunscripción posee una de las mayores concentraciones de residuos tóxicos derivados de operaciones mineras previas en el país, las cuales cesaron sin mediar procesos integrales de rehabilitación y cierre de instalaciones (Chappuis, 2019).

La principal fuente de impacto en las comunidades y sistemas ecológicos en las zonas mineras y sus alrededores proviene de los residuos mineros. Es importante tener en

cuenta que estos residuos pueden ser erosionados por el viento, en lo que se conoce como erosión eólica, y también por el agua de escorrentía (Rosique, 2016).

El sector de Antilla – distrito de Sabaino, provincia de Antabamba, departamento de Apurímac, está ubicado en coordenadas UTM WGS84 Este: 719845.28, Norte: 8413060.48, a una altitud de 3 568 m.s.n.m (Intranett, 2022).

En la propiedad de Antilla se constató 12 concesiones minera que cubrían 7500 ha. En la etapa de exploración en los años 2003 al 2008 se realizaron 75 perforaciones, en la cual tomaron 6000 muestras, donde determinaron que la mineralización en el sector de Antilla mostraban un manto enriquecido de cobre, en mayor porcentaje de ley de 0.56 % Cu (Panoro Minerals Ltd., 2009). De las cuales tiene un área afectada de 16.1 ha por residuos mineros.

La empresa minera Panoro Minerals Ltd., presentó un plan de recuperación de los impactos ocasionados una vez concluido la etapa de exploración en las actividades como el perfilado de relieve en accesos y plataformas (OEFA, 2017).

Para lo cual la empresa minera Panoro Minerals Ltd., no realizó dicha actividad de cierre de las áreas disturbadas y al no haber ejecutado el plan de recuperación de los impactos ocasionados, generando residuos mineros por la presencia de óxidos de cobre en la superficie terrestre en la etapa de exploración en los años 2003 al 2008, estuvo contaminando los suelos, acumulando cobre en la capa superficial del suelo por procesos naturales climáticos , llevando al suelo a la pérdida total de su fertilidad y degradación parcial o total, perjudicando a la vida animal y vegetal existente en el área (OEFA, 2017).

Existen diversas técnicas para mejorar los suelos contaminados por metales pesados como el cobre, estas técnicas podrían ser físicas, químicas y biológicas (Khalid et al., 2017).

La fitorremediación es una técnica empleada para optimizar suelos y aguas contaminadas a través de la degradación de contaminantes, disminuyendo la concentración de metales pesados presentes (López, M. & Morales, O., 2022).. El uso de plantas extrae los metales pesados del suelo contaminado, y tienen la capacidad de concentrar estos metales en su estructura vegetativa (Osman et al.,2017).

Diversas investigaciones han evidenciado las propiedades fitorremediadoras de diversas especies de leguminosas, incluyendo el género Lupinus. Estas plantas no solo contribuyen a mejorar la fertilidad del suelo, tiene la capacidad de fijar nitrógeno atmosférico en el suelo, así mismo acumula metales pesados en su estructura vegetativa, reduciendo la concentración de contaminantes en el suelo (Maguiña, 2017).

Por lo cual, el propósito principal de esta investigación es determinar la capacidad fitorremediadora del tarwi (*Lupinus mutabilis Sweet*) en suelos contaminados con cobre por residuos mineros, que describen las respuestas de concentración en la estructura vegetativa del tarwi, así como las respuestas de los cambios físicos en la estructura vegetativa del tarwi en el suelo contaminado con cobre.

2.1.1. Formulación del problema

2.1.2. Problema general

- ¿Cuál es la capacidad fitorremediadora del tarwi (*Lupinus mutabilis Sweet*) en suelos contaminados con cobre por residuos mineros, del sector de Antilla, distrito de Sabaino, provincia de Antabamba – Apurímac, 2023?

2.1.3. Problemas específicos

- ¿Cuál es la variación inicial y final de la concentración de cobre en el suelo contaminado por residuos mineros del sector de Antilla, distrito de Sabaino, provincia de Antabamba – Apurímac, 2023?.

- ¿Cuál es la variación inicial y final de los parámetros químicos del suelo contaminado con cobre por residuos mineros del sector de Antilla, distrito de Sabaino, provincia de Antabamba – Apurímac, 2023?.
- ¿Cuál es la variación inicial y final de la concentración de cobre en la estructura vegetativa del tarwi (*Lupinus mutabilis Sweet*), en suelos contaminados por residuos mineros del sector de Antilla, distrito de Sabaino, provincia de Antabamba – Apurímac, 2023?
- ¿Cuál es la variación inicial y final de los cambios físicos en la estructura vegetativa del tarwi (*Lupinus mutabilis Sweet*), en suelos contaminados con cobre por residuos mineros del sector de Antilla, distrito de Sabaino, provincia de Antabamba – Apurímac, 2023?

2.2. Objetivos

2.2.1 Objetivo General

- Determinar la capacidad fitorremediadora del tarwi (*Lupinus mutabilis Sweet*) en suelos contaminados con cobre por residuos mineros, del sector de Antilla, distrito de Sabaino, provincia de Antabamba – Apurímac, 2023.

2.2.2 Objetivos Específicos

- Determinar la variación inicial y final de la concentración de cobre en el suelo contaminado por residuos mineros del sector de Antilla, distrito de Sabaino, provincia de Antabamba – Apurímac, 2023.
- Determinar la variación inicial y final de los parámetros químicos del suelo contaminado con cobre por residuos mineros del sector de Antilla, distrito de Sabaino, provincia de Antabamba – Apurímac, 2023.

- Determinar la variación inicial y final de la concentración de cobre en la estructura vegetativa del tarwi (*Lupinus mutabilis Sweet*), en suelos contaminados por residuos mineros del sector de Antilla, distrito de Sabaino, provincia de Antabamba – Apurímac, 2023.
- Determinar la variación inicial y final de los cambios físicos en la estructura vegetativa del tarwi (*Lupinus mutabilis Sweet*), en suelos contaminados con cobre por residuos mineros del sector de Antilla, distrito de Sabaino, provincia de Antabamba – Apurímac, 2023.

2.3. Justificación de la investigación

Esta investigación se llevó cabo debido a la necesidad crítica de abordar la problemática de la contaminación del suelo con cobre por residuos mineros en el sector de Antilla. La contaminación del suelo representa un riesgo para el ambiente local, la salud humana y la producción agrícola en la zona. La falta de soluciones efectivas puede tener consecuencias adversas a largo plazo y, por lo tanto, es esencial investigar en busca de una solución viable.

El propósito principal de esta investigación es determinar la capacidad fitorremediadora del tarwi (*Lupinus mutabilis Sweet*), en suelos contaminados con cobre por residuos mineros en el sector de Antilla. Esto se realiza con la esperanza de proporcionar una solución sostenible para mitigar la contaminación del suelo, restaurar la condición en el suelo y, en última instancia, mejorar la calidad de vida de la población local. Además, se busca contribuir al conocimiento científico sobre la fitorremediación en suelos afectados con cobre.

La investigación se llevó a cabo a través de una serie de experimentos y análisis científicos. Se recolectaron muestras de suelo contaminado con cobre del sector de Antilla y se aplicó el tarwi como planta fitorremediadora. Se realizó mediciones antes y después de la aplicación para determinar los cambios en la concentración de cobre en el suelo y el

tarwi; las propiedades fisicoquímicas del suelo y los cambios de las características de las plantas. Estos datos se analizaron estadísticamente para determinar la eficacia de la fitorremediación.

Esta investigación beneficia a múltiples partes interesadas. En primer lugar, el sector de Antilla se beneficiará directamente al conocer una técnica que puede mejorar la calidad de sus suelos. Las autoridades locales y nacionales también pueden utilizar los resultados para tomar decisiones informadas sobre la gestión de la contaminación del suelo. Además, la comunidad científica y los investigadores en el campo de la remediación de los suelos encontraran valiosos los resultados de este estudio para futuras investigaciones y aplicaciones. En última instancia, esta investigación contribuirá al conocimiento global sobre la fitorremediación de suelos contaminados con cobre por residuos mineros.

2.4. Hipótesis

2.4.1. Hipótesis general

- El tarwi (*Lupinus mutabilis Sweet*), tiene la capacidad de concentrar altos niveles de cobre después del tratamiento de fitorremediación en suelos contaminados con cobre por residuos mineros, del sector de Antilla, distrito de Sabaino, provincia de Antabamba – Apurímac, 2023.

2.4.2. Hipótesis específicas

- Existe una variación significativa entre la concentración inicial y final de cobre en suelos contaminados por residuos mineros del sector de Antilla, distrito de Sabaino, provincia de Antabamba – Apurímac, 2023.
- Se observa una variación significativa de los parámetros químicos inicial y final en suelos contaminados con cobre por residuos mineros del sector de Antilla, distrito de Sabaino, provincia de Antabamba – Apurímac, 2023.

- Se presenta una variación significativa en la concentración inicial y final de la concentración de cobre en la estructura vegetativa del tarwi (*Lupinus mutabilis Sweet),* en suelos contaminados por residuos mineros del sector de Antilla, distrito de Sabaino, provincia de Antabamba – Apurímac, 2023.
- Se identifican una variación significativa inicial y final de los cambios físicos en la estructura vegetativa del tarwi (*Lupinus mutabilis Sweet*), en suelos contaminados con cobre por residuos mineros del sector de Antilla, distrito de Sabaino, provincia de Antabamba – Apurímac, 2023.

2.5. Variables

Tabla 1

Tabla de variables

Variable	Definición conceptual	Dimensión	Indicadores	Escala de medición
Variable Independiente **SUELOS CONTAMINADOS CON COBRE**	Un Suelo contaminado, es aquel cambio que ha sufrido en sus parámetros ya sean químicas, biológicas o físicas, por la introducción de elementos tóxicos, persistiendo en el tiempo y ambiente, es una amenaza grave para la salud pública y el medio ambiente Los metales son elementos naturales del suelo; actúan como poderosos tóxicos, resultando una amenaza para el ser humano y el ecosistema.	Concentración de cobre en el suelo	Cobre inicial	Ordinal mg/kg
			Cobre final	mg/kg
		Parámetros químicos	Conductividad	ds/m
			pH	0 - 14
			Temperatura	°c
Variable dependiente **CAPACIDAD FITORREMEDIADORA DEL TARWI (*Lupinus Mutabilis Sweet*)**	La fitorremediación utiliza plantas para medir la concentración y disminuir contaminantes como metales pesados, en suelos, lodos, sedimentos, y se aplica in situ como ex situ (Corrales, 2014). *Lupinus mutabilis Sweet* ha manifestado ser una especie fitorremediadora para aquellos suelos.	Cambios físicos en la estructura vegetativa del tarwi	Tamaño inicial de la planta	Ordinal cm
			Tamaño final de la planta	cm
			Cantidad de hojas	uni.
		Concentración de cobre en la estructura vegetativa del tarwi	Cobre en las hojas	mg/kg
			Cobre en el tallo	mg/kg
			Cobre en las raíces	mg/kg

Nota. Desarrollo propio.

III. MARCO TEÓRICO

3.1. Antecedentes

3.1.1. A nivel internacional

Duarte, et al. (2020), llevaron a cabo un estudio para evaluar el potencial de concentración de plomo y cobre en áreas pequeñas de vegetacion que se establecieron sobre tres depósitos mineros (Santa Maria I, Santa Maria II y San Juan) en lalocalidad de Zimapan, en el estado de Hidalgo, Mexico. A traves de un enfoque exploratorio, se recolectaron muestras de residuos mineros de la superficie de los tres depositos anteriormente mencionado, ademas de muestras de follaje de la especie *Prosopis Laevigata*. Estas muestras se trasladaron al laboratorio, donde se llevaron a cabo analisis fisicos y quimicos exhaustivos de los residuos mineros. Los resultados revelaron que en el área de San Juan, la concentracion de plomo en las hojas de *P. Laevigata* alcanzo los 93.05 mg/kg, mientras que la concentracion de cobre en las hojas de esta misma especie llego a los 52.46 mg/kg. Estos hallazgos indican que *P. Laevigata* tiene la capacidad de bioacumular plomo y cobre en sus hojas, incluso en condiciones de contaminacion extrema.

Noguez et al. (2017), en su estudio previo realizado abordaron métodos alternativos para la restauración en suelos con elevadas concentraciones de elementos potencialmente toxicos (EPT), mediante el uso de leguminosas. Este trabajo incluyó una revisión de diversas investigaciones, entre las cuales se destacó el estudio de Branzini et al., (2012). En dicho estudio exploraron el potencial de la especie Acacia Café (*Sesbania virgata*), en la interacción con los elementos cobre, zinc y cromo en la remediación de suelos contaminados. La experimentación de Branzini (2012), se realizó en recipientes, donde se añadieron cantidades variables de metales pesados al suelo, abarcando tanto dosis mínimas como máximas. Los resultados revelaron la acumulación de altas concentraciones de cobre (500 mg/kg), zinc (800 mg/kg) y cromo (160 mg/kg) en la especie Acacia Café. Esto sugiere que la especie tiene la capacidad de estabilizar estos EPT en su

sistema radicular. Como resultado de estos hallazgos, se sugiere la utilización de Acacia Café en la fitoestabilización en la presencia de elementos con potencial toxicidad en suelos contaminados.

Pizarro et al. (2016), identificaron y realizaron una comparación de la capacidad estabilizadora de plantas nativas y exóticas en regiones afectadas por la minería en Coquimbo – Chile. Se observó la supervivencia, crecimiento y desarrollo de 20 variedades (14 variedades de árboles, 04 variedades de arbustos, 02 variedades herbáceas) se evaluó en dos periodos, en tres estratos de suelo (10 cm - 20 cm, 40 cm – 50cm, y 60cm - 80 cm). El total de cobre concentrado en el suelo fue analizado en un laboratorio, donde se midió a través de la espectrometría de absorción atómica. Los resultados demostraron que la especie *Acacia saligna* posee la mayor capacidad de acumulación de metales pesados (el contenido de metales pesados en hojas fue de 34.8 ppm y en tallos fue de 12.3 ppm), y la tasa de supervivencia fue superior al 78.8%. Concluyeron que A. saligna es una especie que se puede utilizar como fitoextractora en superficies contaminados con relaves mineros demostrando que la tasa de supervivencia fue de 78.8%.

3.1.2. A nivel nacional

Castañeda, (2022), analizó e hizo una revisión documental bibliográfica de los cultivos de *Lupinus albus* y la bioacumulación de metales. Se tomaron muestras foliares (raíz, tallo y hojas) del *L. albus*, para el análisis de datos, revelaron concentraciones elevadas de ciertos metales como plomo alcanzando 6094 mg/kg, mercurio alcanzando 125 mg/kg y magnesio alcanzando 469.30 mg/kg, mientras que otros, como el cadmio, se encontraron en proporciones menores con 50.13 mg/kg. Provocando una bioacumulacion más notable en la región radicular de la planta. La conclusión obtenida fue que la especie *L. albus* tiene la capacidad de asimilar metales en su estructura vegetativa, ocasionando una acumulación significativa de estos elementos.

Diaz et al. (2019), determinaron la eficacia del *Lupinus mutabilis* asistido por *Bradyrhizobium* para la absorción del cadmio en tanto el suelo como la planta. Tomaron suelos agrícolas de la UNALM, realizaron cuatro tratamientos (T0 0 mg CdCl2/kg, T1 50 mg CdCl2/kg, T2 80 mg CdCl2/kg, T3 100 mg CdCl2/kg, T4 110 mg CdCl2/kg) y un control, usaron 75 plantulas de tarwi, analizaron a nivel de laboratorio. Así mismo determinaron las características físicas del *L. mutabilis*, donde demostraron que en el tratamiento T1 (tallo 35.23 cm) fue mucho mayor que el T4 (tallo 13.30 cm) donde presento deficiencia en el desarrollo de la planta, concluyendo que a mayor concentración de Cd menor desarrollo de la planta en un periodo de 80 días; determinaron la concentración cadmio en la estructura radicular de la planta donde el T4 mostró mayor acumulación con un resultado de 22.82 mg/kg, llegando a la conclusion de que a medida que la concentración de cadmio aumenta en el suelo mayor absorción en las raíces. Después de un periodo de 80 días las concentraciones de cadmio presentes en el suelo registraron niveles de: T1 25.00 mg/Kg, T2 45.75 mg/Kg, T3 64.43 mg/Kg, T4 67.70 mg/Kg de Cd, con porcentajes de remoción de 45%, 42%, 32%, 34%. La conclusión a la que llegaron fue que a medida que la concentración de cadmio aumenta disminuye el porcentaje de remoción. La eficacia del *L. mutabilis* con la asistencia de *Bradyrhizobium* en la eliminación de Cd en el suelo se mantuvo.

Gonzales et al. (2018), determinaron el impacto de la especie *Medicago sativa*, conocida como “alfalfa”, en su capacidad de fitorremediación en un suelo contaminado con dos concentraciones diferentes de cobre (Cu), el suelo utilizado fue provenido de las instalaciones de la UCT, decidieron introducir artificialmente en un suelo franco arenoso, en el suelo tratamiento T1 se decidio aplicar 0,53 gr CuS04/kg, mientras que en el suelo tratamiento T2 0.66 gr CuS04/kg. En un periodo de 02 meses las concentraciones de Cu redujeron significativamente en el suelo sembrado con M. sativa, de 278 ppm a 124 ppm y de 293 ppm a 143 ppm en el tratamiento T1 0.53 gr/kg de suelo y T2 0.66 gr/kg de suelo, respectivamente. Se observó una mayor concentración en la estructura radicular en

comparación con los tallos; especificamente, el tratamiento T2 registró una acumulación de 78 ppm, cifra superior a los 44 ppm del tratamiento T1. En cuanto a la concentración de cobre en las tallos, el tratamiento T2 mostró una concentración de 21 ppm, superando al tratamiento T1 que presentó 18 ppm. La *M. sativa* es reconocida por su capacidad para remediar suelos contaminados con cobre mediante procesos de fitorremediación.

Maguiña (2017), determinó la capacidad de fitorremediar con *Lupinus mutabilis Sweet* en una superficie contaminado con Cadmio (Cd). La práctica se efectuó en un invernadero de la Universidad Ricardo Palma. La investigación fue realizada en maceteros con un diámetro de 21 cm y una altura de 18.4 cm, en cada macetero se colocó 6kg de arena de cuarzo (adquirido de Minerals Supply & Services S.A.C). Se sembraron tres especies de L. mutabilis en cada maceta. Colocando distintos tratamientos (T1 – 4 mg, T2 – 8 mg, T3 – 12 mg, T4 – 16 mg de CdSO4) cada 15 días, durante un periodo de 65 días. Se obtuvo como resultado: su acumulación del metal en la planta que fue imperceptible, observada en los tratamientos. La mayor absorción del cadmio fue en la estructura radicular con una concentración 3.13 mg/kg, mientras que en el tallo fue de 0.15 mg/kg y en las hojas de 0.13 mg/kg, en el tratamiento T4. Demostrando que existe una capacidad fitorremediadora reducida, de acuerdo al aumento de Cd.

Peña et al. (2014), analizaron cinco especies altoandinas (*Solanum nitidum, Brassica rapa L., Fuertesimalva echinata, Urtica urens y Lupinus ballianus*), fueron colectadas en el distrito de Lachaqui, provincia de Canta, realizado en condiciones de invernadero en un periodo de 12 meses. Se realizó en macetas de 19 cm de diámetro con una capacidad de 5kg, los cuales fueron evaluados 20 tratamientos con cinco repeticiones por tratamiento (30 %, 60 %, 100 % de relave de mina y un suelo control), analizaron metales pesados como plomo (Pb), zinc (Zn) y cadmio (Cd). Observaron una disminución significativa de biomasa en las cinco especies altoandinas aplicado en el tratamiento de 100 % de relave de mina. Obteniendo como resultado que en las estructura radicular de la

especie *L. ballianus* absorbió 287.3 mg/Kg con una mayor acumulación de cadmio, las especies analizadas tienen la capacidad de absorber los metales pesados.

3.1.3. A nivel regional y local

En el contexto de antecedentes locales, es importante destacar que hasta la fecha no se han realizado estudios previos en esta área específica. La usencia de investigaciones anteriores sobre el tema en nuestra localidad subraya la relevancia y la necesidad de llevar a cabo un estudio en este campo. Este vacío en la investigación local ofrece una oportunidad valiosa para contribuir al conocimiento y la comprensión de la problemática que se abordara en esta investigación, proporcionando una base sólida para el desarrollo y la justificación del estudio actual.

3.2. Bases teóricas

3.2.1. Fitorremediación

La fitorremediación es una estrategia de biorestauración que aprovecha una diversidad de especies vegetales, en colaboración con microorganismos para remediar el ambiente. Su objetivo es rehabilitar el entorno, ya sea suelo, agua o aire, a través de procesos que abarcan la estabilización, extracción, degradación y acumulación de diversos contaminantes, como metales pesados, sustancias orgánicas, entre otros. Este enfoque representa una opción rentable y respetuosa con el ambiente (Guzmán, 2021).

3.2.2. Acumulación de metales pesados en las plantas

Numerosas especies demuestran una tolerancia a las concentraciones elevadas de metales en el suelo al limitar su absorción y/o traslocación hacia las hojas. No obstante, algunas absorben activamente estos metales y los acumulan en su biomasa aérea, lo que demanda una fisiología altamente especializada. Se han identificado diversos niveles de acumulación metálica, desde incrementos ligeros por encima de los niveles base hasta

respuestas extremas, en las cuales la concentración del metal puede superar el 1% de la materia seca de la planta (Papuico, 2018).

Existe variabilidad en la capacidad de los órganos vegetales para acumular metales. Cuando la fuente de estos elementos proviene del suelo, la tendencia general es que los niveles de concentración disminuyen en el siguiente orden: raíces > tallos > hojas > frutos > semillas (Papuico, 2018).

3.2.3. Generalidades del tarwi (*Lupinus mutabilis Sweet*)

3.2.3.1. Taxonomía

Camarena, et al. (2012), define la clasificación taxonómica de la siguiente manera:

Reino: Vegetal

División: Fanerógama

Clase: Dicotiledónea

Orden: Fabales

Familia: Fabaceae

Tribu: Genisteae

Género: *Lupinus*

Especie: *Lupinus mutabilis* Sweet

A. Nombre científico: *Lupinus mutabilis Sweet*

En la región de los Andes, se pueden identificar alrededor de 83 especies silvestres pertenecientes a este género, presumiblemente originadas a partir de cambios naturales en una o varias de estos géneros (Zavaleta, 2018).

Otras variedades de lupino o altramuz, representadas por especímenes del género Lupinus, originarias de Europa y de significativa importancia en la agricultura más allá de la región andina, incluyen *L. albus, L. luteus y L. angustifolius*. Pertenece a la familia Fabaceae, del género *Lupinus* y es de la especie *L. mutabilis* (Zavaleta, 2018).

B. Nombres comunes:

Recibe diferentes denominaciones según la región donde se encuentra, en Perú y Ecuador se le conoce como chocho o tarwi y en Bolivia como chuchus muti.

Figura 1

Planta de tarwi (Lupinus mutabilis Sweet).

Nota. Extraído de Zavaleta (2018).

3.2.3.2. Origen y distribución geográfica

A. Origen

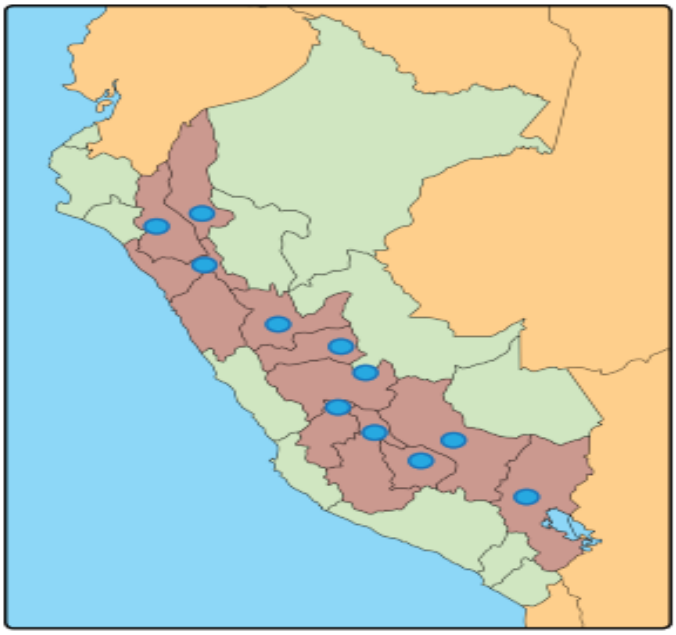
La planta de tarwi pertenece a la familia Fabaceae y es originaria de los Andes de Perú, Bolivia y Ecuador. Su cultivo se remonta a épocas preincaicas, alcanzando su punto máximo de desarrollo y avance durante la época incaica (Zavaleta, 2018).

B. Distribución geográfica

En el territorio peruano, el cultivo del tarwi se lleva a cabo en diversas regiones, entre las que se incluyen Cajamarca, Puno, La Libertad, Amazonas, Huánuco, Huancavelica, Áncash, Ayacucho, Junín, Pasco, Apurímac, Cusco y Puno (Zavaleta, 2018).

Figura 2

Distribución geográfica del tarwi.



Nota. Extraído de Zavaleta (2018).

3.2.3.3. Botánica, fenología, fisiología y beneficios del cultivo

A. Raíz

El tarwi presenta una raíz pivotante, vigorosa y que se extiende hasta 45-50 cm de profundidad. Desarrollando un proceso de simbiosis con bacterias nitrificantes del género *Rhizobium lupini*, dando lugar a la formación de nódulos de dimensiones diversas, que oscila entre 1 a 3 centímetros (Zavaleta, 2018).

Figura 3

Raíz del tarwi.

Nota. Extraído de Zavaleta (2018).

B. Hoja

La hoja del tarwi está compuesta por ocho foliolos que varían entre ovalados a lanceolados. Las hojas del tarwi varían de color dependiendo del contenido de antocianina, así mismo presentan menos vellosidades (Zavaleta, 2018).

Figura 4

Hojas de tarwi.

Nota. Extraído de Zavaleta (2018).

C. Tallo

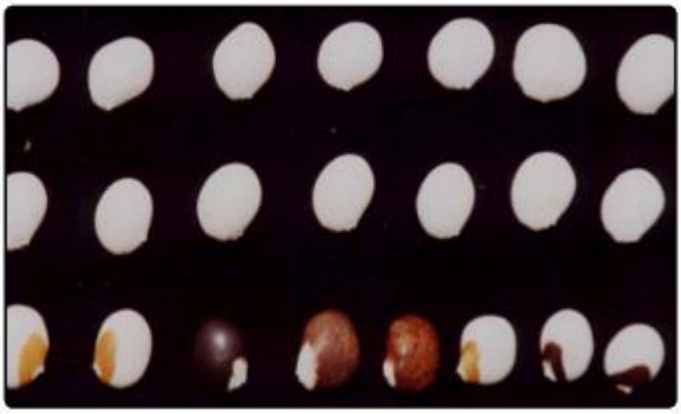
La altura del tallo del tarwi varía entre 0,5 a 2,0 m, con un nivel alto de fibra y celulosa. La tonalidad de la planta abarca desde un verde intenso hasta tonos castaños, mientras que en las especies silvestres presenta una coloración rojiza o morada oscura. La cantidad de ramificaciones varía, pudiendo ir desde unas cuantas hasta un máximo de 52 ramas (Zavaleta, 2018).

D. Semilla

Las semillas de tarwi, presenta una forma ovalada están alojadas en una vaina de 5 a 12 cm, tienen dimensiones que oscilan entre 0,5 y 1,5 cm. La coloración de las semillas presenta una amplia gama que incluye tonalidades como blanco, amarillo, gris, ocre, pardo, castaño, marrón, así como combinaciones de colores como jaspeados, marmoleado, media luna, ceja y salpicado. El tamaño de las semillas está condicionado por diversos factores, entre ellos, las condiciones ambientales y la variedad de cultivo (Zavaleta, 2018).

Figura 5

Colores y formas de semilla de tarwi.



Nota. Extraído de Zavaleta (2018).

E. Fenología del cultivo

Las etapas fenológicas que experimenta el cultivo del tarwi, desde el primer día que es cultivado pasa a la fase de emergencia donde se observa la presencia de dos primeros órganos foliares, llamados cotiledones, de tonalidad verde, extendidos horizontalmente sobre la superficie del suelo. Esto ocurre en un periodo de 15 y 25 días después de la siembra, posteriormente en el primer racimo floral, surgen hojas de cuatro a cinco (Zavaleta, 2018).

Pasado los 100 a 120 días, es visible la primera flor ubicada en el racimo central del eje, cuando la primera flor llega a marchitarse, surge la primera vaina (Zavaleta, 2018).

F. Fisiología

Las leguminosas, como el tarwi, presentan una ventaja significativa en el proceso de fitorremediación debido a su capacidad de formar simbiosis con comunidades de microrganismos en la zona radicular. Esta relación simbiótica permite la fijación de nutrientes esenciales, como el nitrógeno, y el desarrollo de mecanismos fisiológicos que les permiten resistir, tolerar y sobrevivir en suelos degradados (Paredes & Rodríguez, 2020).

Además, estas plantas pueden limitar la absorción de metales, traslocarlos hacia las hojas a través de la xilema, o absorberlos y acumularlos activamente en su biomasa.

El xilema juega un papel crucial en la traslocación, movilizando los contaminantes desde las raíces hacia las partes aéreas de las plantas. (Paredes & Rodríguez, 2020).

G. Beneficios del tarwi

La planta de tarwi tiene la capacidad de fijar 50 kilos de nitrógeno por hectárea mediante su estructura radicular. Su follaje genera una abundancia de nutrientes que contribuyen a mejorar la calidad de suelos áridos y con escasa materia orgánica. La inclusión de los residuos de la planta representa una estrategia efectiva para mitigar los riesgos de degradación del suelo y potenciar la producción hasta en un 50 % en cosechas subsiguientes (Leyton, 2020).

Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), las legumbres, incluido el tarwi, contribuyen a la absorción de carbono en el suelo y prescinden de la necesidad de fertilizantes nitrogenados, ya que tienen la capacidad de fijar su propio nitrógeno directamente de la atmosfera y transportarlo a través de sus raíces (Leyton, 2020).

3.2.4. Suelo

El suelo se considera como un organismo natural cuyas propiedades y categorización es de beneficio; es tomado para el soporte de la vida y crecimiento de la vegetación (Hernández J. , 2011).

Asimismo, es el medio donde realizan actividades ganaderas, agrícolas, así como actividades industriales. El suelo constituye un recurso natural que exhibe dinamismo y complejidad, el mantenimiento de su equilibrio se fundamenta en la interrelación entre sus características físicas, químicas y biológicas (Rodriguez, 2018).

3.2.5. Propiedades químicas del suelo

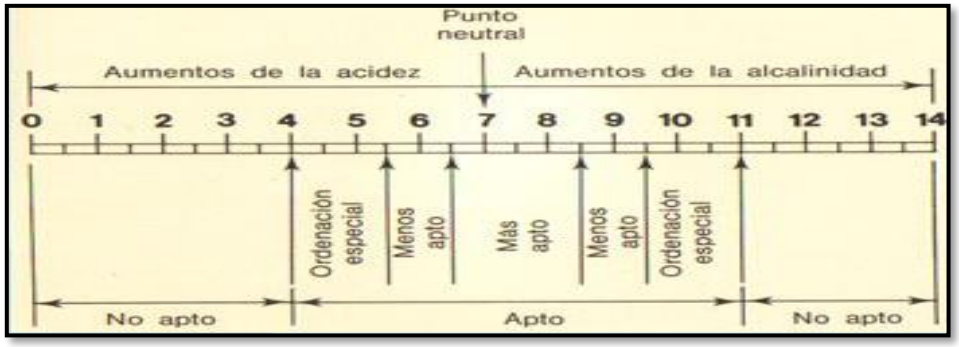
3.2.5.1. El pH del suelo

La acidez o alcalinidad de una solución en el suelo se ve mayormente influenciada por su pH, una característica química fundamental que repercute en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. La abreviatura “pH” denota el “potencial de hidrogeno” (Callizaya, 2015).

El concepto de pH refleja la concentración de iones de hidrogeno en una solución. Esta medida se encuentra en una escala que va desde 0 hasta 14, donde un valor de 7 indica un suelo neutro apto para cultivos, siendo 14 el valor máximo suelo alcalino no apto para cultivos, y 0 el valor mínimo con mayor acidez no apto para cultivos (Callizaya, 2015).

Figura 6

Escala del valor pH.



Nota. Extraído de Organización de las naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), (2024).

3.2.5.2. Conductividad eléctrica (CE)

La conductividad eléctrica se utiliza como una evaluación indirecta de la presencia de sales en el suelo, y sus resultados se expresan en dS/m. La presencia de concentraciones elevadas de sales en suelos puede obstaculizar el desarrollo óptimo de las plantas (Callizaya, 2015).

Tabla 2

Clasificación de la salinidad de los suelos según la conductividad eléctrica.

$CE_{l:5}$ dSm^{-1}	CE_{ps} dSm^{-1}	Calificativo
<0.35	<2	No salino
0.35 - 0.65	2 - 4	Ligeramente salino
0.65 – 1.15	4 - 8	Salino
>1.15	>8	Muy salino

Nota. Extraído de Soriano (2018).

3.2.6. Contaminación de suelo

Conforme al Decreto Supremo N° 002-2013-MINAM del Ministerio del Ambiente, se establece la definición de suelo contaminado como aquel cuyas propiedades químicas han experimentado una modificación adversa debido a la presencia de sustancias contaminantes depositadas como resultado de la actividad humana.

3.2.6.1. Contaminación de suelos por actividades mineras

La industria minera es una de las actividades con un riesgo significativo ambiental a escala mundial. En esta situación, la disposición directa o indirecta de desechos mineros en el suelo resulta afectando, generando en muchos casos la contaminación con elementos o compuestos perjudiciales para la salud del hombre y asi mismo a la flora y fauna existente (Rosique, 2016).

3.2.6.2. Residuos mineros

Se considera residuo minero a aquellos residuos sólidos generados en la etapa de exploración y/o explotación de un recurso geológico, tales como estériles de mina, colas de proceso e incluso la tierra vegetal retirada en diferentes procesos (Rosique, 2016).

3.2.7. Metales pesados

Se dividen en dos tipos: aquellos que en mínimas proporciones son altamente toxicas, capaz de acumular en el organismo vivo y el otro que son los micronutrientes que requieren en cantidades imperceptibles para las plantas y animales, si estas superan se tornan tóxicos (García & Dorronsoro, 2005).

3.2.7.1. Metales pesados en el ambiente

El principal contribuyente a la contaminación ambiental, es debido a la existencia de metales pesados, son contaminantes inorgánicos con una gran toxicidad. La acumulación de estos elementos, complica el adecuado funcionamiento de los macroorganismos y seres vivientes (Nies, 1999).

Metales como el Pb, Cu, Zn, etc.; su alta concentración induce a efectos que perjudican las propiedades químicas, físicas y biológicas del suelo; obstaculizando el adecuado crecimiento de las plantas (Sierra, 2006).

3.2.7.2. Cobre en el Ambiente

A. Cobre

El cobre desempeña un papel crucial micronutriente en diversos procesos fisiológicos de las plantas como la fotosíntesis, la respiración, la distribución de carbohidratos, etc. Además, contribuye a la resistencia contra enfermedades (Guzmán, 2021).

El cobre es necesario para llevar a cabo ciertas funciones metabólicas en los organismos. Este elemento se convierte en un contaminante para los ecosistemas acuáticos debido a su duradera presencia, toxicidad y su habilidad para integrarse en las cadenas alimenticias del entorno. Los niveles superiores de este elemento son tóxicos (Awofolu, 2005).

La disminución en el tamaño de las células causada por la presencia de cobre resulta en una contracción en el diámetro de las raíces y tallos, así como reducción en el crecimiento de las hojas, señalando que el cobre impacta el proceso de expansión celular (Morales & Sepulveda, 2012).

B. Propiedades

Elemento de símbolo Cu, metal que más se usa, tiene aspecto metálico se presenta en estado puro, excesiva conductividad de calor y electricidad, no se corroe fácilmente (Ozuna, 2007).

C. Usos

Se usa industrialmente, así como domésticamente, como:

- Se emplea para productos eléctricos: cables, hilos, etc.
- Además, el cobre encuentra aplicación en la agricultura en forma de compuestos, particularmente en fungicidas (Wong et al., 2006).

D. Efectos a la salud

El nutriente especial para el cuerpo es el cobre. Si es inhalado a través de polvo o humos puede producir una intoxicación, si la concentración del cobre es excesiva, produce la muerte a través de una cirrosis hepática (Awofolu, 2005).

Los niveles excesivos de cobre pueden inducir lesiones celulares, afectar el cerebro y los riñones, provocar anemia severa, generar irritación intestinal y dar lugar a la enfermedad de Wilson (Guzmán, 2021).

E. Fuentes

Este metal se encuentra en la superficie terrestre, en las últimas décadas la elaboración de cobre ha aumentado, las cantidades de cobre se ha incrementado debido a la minería (Ozuna, 2007).

3.2.8. Marco Legal

3.2.8.1. Normativa Ambiental

En el Perú, las normas ambientales se enfocan en proteger, preservar, cuidar el ambiente de aquellos que puedan alterar su entorno, ya sea en suelo, agua y aire, asimismo el Ministerio del Ambiente tiene la responsabilidad de detectar y supervisar

situaciones que presenten contaminación, requiriendo una intervención inmediata (MINAM, 2005). En este caso tomaremos normativas ambientales internacionales debido a que no existe estándares de calidad ambiental para suelos contaminados con cobre.

3.2.8.2. Parámetros Internacionales

En nuestro país los estándares de calidad ambiental, los criterios de calidad ambiental representan medidas que evalúan la concentración de diversos compuestos metálicos, lo cual no existe un límite de concentración para lo que es cobre en el suelo, es por ello que se está tomando parámetros internacionales para la concentración de cobre en suelos.

Tabla 3

Parámetros para la concentración de cobre en el suelo (mg/kg).

Elemento	Kabata - Pendias y Pendias, 2000		
	Suficiente o normal	Suficiente o tóxica	Tolerante por algunos cultivos
Cu	11.07	20-100	5.0-20

Nota. Extraído de Kabata Pendias (2000).

Además, para evaluar la calidad del suelo, se llevará a cabo la comparación con el estándar de calidad ambiental para suelos establecido en la Guía de Canadá.

Tabla 4

Estándares de calidad ambiental para suelo según Canadian Soil Quality Guidelines

SUMMARY TABLES
Update 7.0

Canadian Soil Quality Guidelines For the Protection of Enviromental and Human Health

Interim remediation criterio for soil (mg-kg^{-1}) that have not yet been replaced by Canadian Soil Quiality Guidelines

		Land use			
Parameter	**Year released**	**Agricultural**	**Residensial/ parkland**	**Commercial**	**Industrial**
General Parameters					
Conductivity (ds/m)	1991	2	2	4	4
pH	1991	6 to 8	6 to 8	6 to 8	6 to 8

Nota. Extraído de Canadian Environmental Quality Guidelines Canadian Council of Ministers of the Environment Canadian Soil Quality Guidelines for the Protection of Environmental and Human Health (1999).

3.3. Definición de términos

1. **Absorción:** Es un suceso físico-químico, mediante el cual las especies que se encuentran en fase liquida o gaseosa traspasan la superficie y se propagan dentro de su estructura, estas pueden ser orgánicos e inorgánicos (Pérez, 2020).
2. **Bioacumulación:** La acumulación de concentraciones resultantes en el ambiente o en los tejidos de un organismo se deriva de la absorción, distribución y eliminación de contaminantes adquiridos a través de diferentes vías de exposición, como el aire, el agua, el suelo, los sedimentos y los alimentos (MINAM, 2015).
3. **Calidad de suelos:** Se refiere a la calidad del suelo, considerando sus propiedades físicas, químicas y biológicas, que le confieren la capacidad de mantener un potencial ecosistémico tanto natural como antropogénico (MINAM, 2015).
4. **Capacidad:** Propiedad de poder acumular compuestos químicos, en un determinado periodo.
5. **Concentración:** Se refiere a la proporción de una sustancia disuelta o presente en una cantidad especifica con respecto a otra sustancia (MINAM, 2015).
6. **Contaminación:** Dispersión de una sustancia química o una combinación de sustancias en un área no deseada, como el aire o el suelo, dando lugar a posibles impactos prejudiciales para el ambiente o la salud (MINAM, 2015).
7. **Contaminante:** Cualquier compuesto químico que no sea parte natural del suelo o cuya cantidad supere el nivel de fondo, lo cual podría resultar en efectos perjudiciales para la salud humana o el entorno (MINAM, 2015).
8. **Estructura Vegetativa:** Como las raíces, tallos y hojas, son partes fundamentales de las plantas, cumpliendo una función esencial para su desarrollo y supervivencia.
9. **Exclusoras:** Conocido como hipertolerantes, soportan hasta cierto punto los metales pesados, debido a que presenta un mecanismo de exclusión, que evita que estos elementos entren en las células (Guzmán, 2021).

10. **Fitoestabilización:** Método que permite que las plantas inmovilicen los metales pesados en los suelos a través de la absorción por las raíces o la reducción de metales pesados en la rizosfera (Guzmán, 2021).
11. **Fitoextracción:** Es la extracción y acumulación de contaminantes a través de las raíces de las plantas absorbiendo de diversos medios como suelos, agua o sedimentos, posteriormente son almacenados tejidos superiores de la planta como los tallos, hojas o flores (Guzmán, 2021).
12. **Hiperacumuladoras:** son particularmente significativas, ya que sobrevivir a altas concentraciones de metales pesados, sino que también concentran estas sustancias en su estructura aérea (Guzmán, 2021).
13. **Plan de muestreo:** Documento que incluye los detalles y la planificación asociada a cada fase del proceso de muestreo, estableciendo los criterios que guiaran la recopilación de muestras (MINAM, 2015).
14. **Suelo Ácido:** Cuando el pH se reduce por debajo de 5.5, los niveles de acidez son tan altos que nutrientes como el calcio, magnesio, molibdeno y fósforo pueden no estar tan disponibles para las plantas, las que sufrirán deficiencia nutricional (Milton, 2016).
15. **Suelo Alcalino:** Los suelos alcalinos se caracterizan por ser arcillosos, tener un pH elevado (>9), presentar una estructura deficiente y compacta, una capacidad de infiltración baja y una permeabilidad lenta. Estos suelos representan un desafío para la agricultura debido a sus condiciones adversas para el cultivo (Artedinamico, 2023).

IV. METODOLOGÍA

4.1. Tipo y nivel de investigación

4.1.1. Tipo de investigación

La investigación, según el objetivo planteado fue de tipo aplicativo. Paz (2014), señala que la investigación aplicativa se fundamenta en los hallazgos de la ciencia básica, con el propósito de aplicarlos en la practica y abordar las necesidades evidentes en la sociedad, proporcionando soluciones concretas.

Esta investigación sirve como apoyo a los conocimientos y métodos que apoyaran en la resolución de problemas en beneficio de la población. Así mismo en esta investigación se usó el tarwi (*Lupinus mutabilis Sweet*) para la reducción de cobre en suelos contaminados por residuos mineros ya que afectan a la calidad de vida de la población, animales y vegetación.

4.1.2. Nivel de investigación

La investigación fue de nivel explicativo, porque va más allá de solo conceptos; es decir, explica porque sucede un fenómeno, relacionándose dos o más variables (Gómez, 2006).

En la investigación se explicó la reducción de concentración de cobre en suelos contaminados con cobre por residuos mineros utilizando el tarwi (*Lupinus mutabilis Sweet*), además de abordar las causas, es necesario proporcionar una explicación detallada de por qué se produce el fenómeno.

4.2. Ámbito temporal y espacial

4.2.1. Ámbito temporal

La investigación tuvo una duración de 12 meses, contados desde la compilación de información (noviembre 2022), para la ejecución de esta de investigación hasta la presentación del informe de tesis (setiembre 2023). Este marco temporal se eligió debido

a la necesidad de realizar un seguimiento de los efectos de la fitorremediación a lo largo de un periodo suficiente significativo para obtener resultados representativos.

4.2.2. Ámbito espacial

La investigación se ejecutó en el sector de Antilla, distrito de Sabaino, Provincia de Antabamba, geográficamente se encuentra en las coordenadas UTM y de acuerdo al Datum WGS-84 está comprendido en la siguiente ubicación:

Este: 719845.28 m

Norte: 8413060.48 m

Altitud: 3568 m.s.n.m.

4.3. Población y muestra

4.3.1. Población

La población fueron los suelos contaminados con cobre por residuos mineros en la etapa de exploración. La investigación se encuentra ubicado en el sector de Antilla, distrito de Sabaino, el cual está situado en la provincia de Antabamba departamento de Apurímac. En coordenadas UTM y Datum WGS-84 está comprendido en 719845.28 m E y 8413060.48 m S, a una altitud de 3568 m.s.n.m; el área afectada por residuos mineros es de 16.1 ha.

4.3.2. Muestra

Se tomaron nueve puntos de muestreo (ocho puntos de suelo contaminado y un punto de suelo control), un total de 16 kg de suelo contaminado y 2 kg de suelo control.

4.4. Instrumentos

La técnica principal para el estudio de investigación fue la experimentación in situ, la observación durante la experimentación fue utilizado para ver los cambios producidos en la planta, para finalmente estas ser llevadas a una ficha de control.

Tabla 5

Técnicas e instrumentos de recolección de datos.

Técnicas	Instrumentos
Revisión bibliográfica	Repositorios de Universidades y consulta a especialistas.
Observación directa	**Determinación de la variación de los cambios físicos de la estructura vegetativa del tarwi** Antes y después de la fase experimental se tomaron registros, se realizó la medición del tamaño del tarwi, así mismo se contabilizó la cantidad de hojas. Se basó en la determinación de la variación de los cambios físicos en la estructura vegetativa del tarwi en el tratamiento.
Análisis de Laboratorio	▪ Espectrofotometría de Absorción Atómica. **Determinación de la concentración de cobre en la estructura vegetativa** Al iniciar y al finalizar la fase experimental se realizó el análisis de la concentración de cobre en la estructura vegetativa (hojas, tallo y raíz), en un laboratorio acreditado por el INACAL, las muestras se enviaron al laboratorio Pacific Control, se realizó la comparación de los resultados iniciales y finales proporcionados por el laboratorio. **Determinación de la concentración de cobre en el suelo** Se realizó un análisis del suelo inicial y final de la fase experimental, en un laboratorio acreditado por el INACAL, las muestras se enviaron al laboratorio Pacific Control. Luego de obtener los resultados se realizó la

	comparación inicial y final, para observar cuanto fue remoción de cobre en el suelo. ▪ Potenciómetro. ▪ Conductímetro. ▪ Termómetro ambiental **Determinación de los parámetros químicos** Para la determinación del pH y Conductividad Eléctrica, se realizó un análisis del suelo inicial y final, en el Laboratorio de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental de la UTEA. El análisis se realizó dos repeticiones por cada muestra de suelo. Para la determinación de la Temperaturas, se registró la temperatura semanalmente en el invernadero.
Pruebas Estadísticas	Software SPSS

Nota. Desarrollo propio.

4.5. Procedimientos

4.5.1. Preparación del entorno experimental

Se acondicionó un invernadero para la experimentación en el sector de Antilla, para la edificación del invernadero, se emplearon los materiales que se detallan a continuación:

- Tubos
- Malla crashell
- Palos de eucalipto y otros instrumentos.

La estructura fue ensamblada utilizando tubos, y se instalaron los correspondientes soportes con palos de eucalipto. Se colocaron la malla crashell de tal manera que cubra toda la estructura.

Se colocó un termómetro ambiental en el interior del invernadero con el propósito de supervisar la temperatura.

Cabe recalcar que la decisión de realizar el estudio en un invernadero fue por la necesidad de controlar las condiciones experimentales para obtener resultados precisos y comparables, así mismo se pudo controlar el factor ambiental como la temperatura. Además, el invernadero proporcionó un entorno seguro y controlado para manipular y estudiar el tarwi en condiciones que no solo imitan, sino que optimizan, las condiciones ideales para la investigación.

4.5.2. Muestreo de suelos contaminados con cobre para el tratamiento

4.5.2.1. Diseño del plan de muestreo:

Muestreo específico:

Para llevar a cabo el muestreo específico de la zona, se diseñó un plan de muestreo de suelo, que consistió en un procedimiento aleatorio.

Con este procedimiento los puntos de muestreo fueron localizados a una distancia fija de un primer punto de muestreo aleatorio.

Se aplicó este tipo de muestreo ya que tiene un área afectada de 16.1 ha por residuos mineros (ver figura 7), así mismo la geografía de la zona muestra un terreno empinoso y de difícil acceso por el cual no se tuvo la evidencia sobre la homogeneidad del contaminante en la zona.

4.5.2.2. Localización de los puntos de muestreo

Para determinar la factibilidad del uso de plantas como medida de fitorremediación en la zona, se localizó los nueve puntos de muestreo del suelo del área contaminada debidamente ubicados con coordenadas UTM de acuerdo al Datum WGS-84, de la zona 18L.

Asimismo, se determinó los puntos de muestreo aquellas zonas más afectadas.

Tabla 6

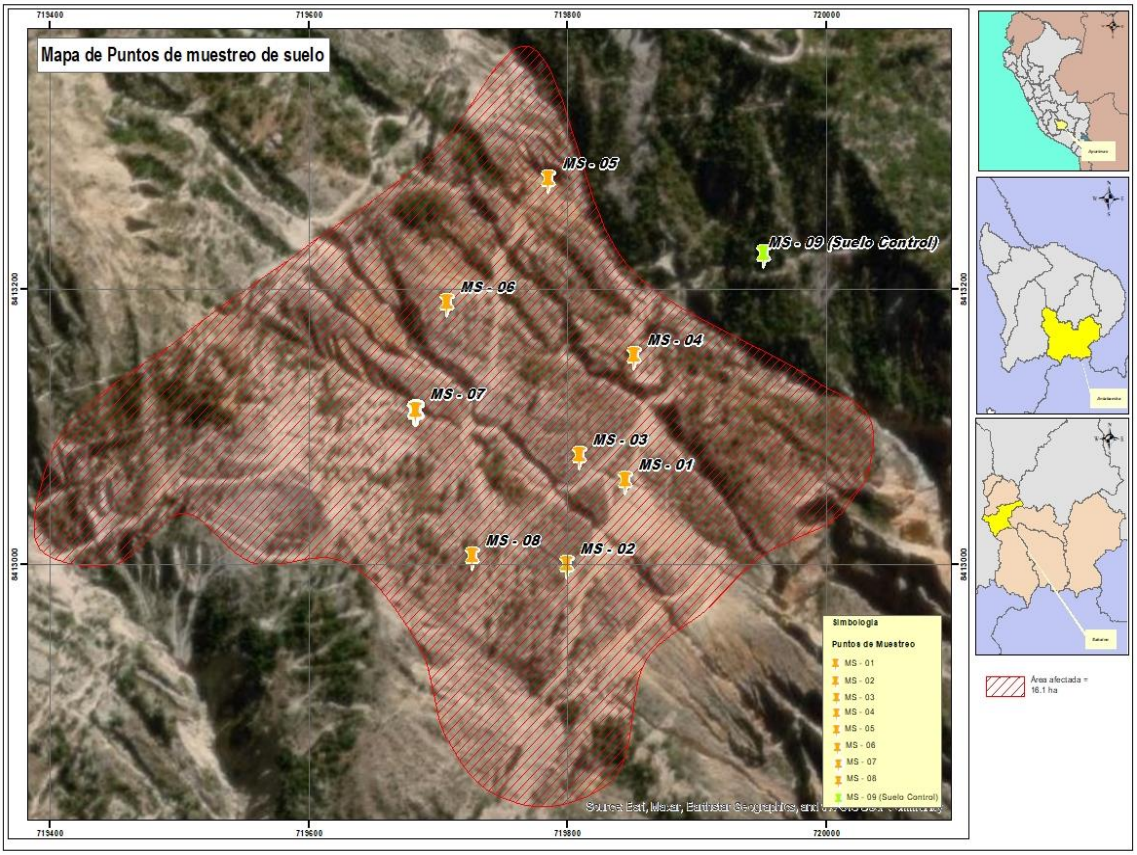
Localización de puntos de recolección de muestras de suelo.

Puntos muestreo	coordenadas UTM y de acuerdo al Datum WGS-84	
	Este	Norte
MS - 01	719,845.00	8,413,060.00
MS – 02	719,800.00	8,412,999.00
MS – 03	719,810.00	8,413,078.00
MS – 04	719,852.00	8,413,150.00
MS – 05	719,786.00	8,413,278.00
MS – 06	719,707.00	8,413,189.00
MS – 07	719,683.00	8,413,110.00
MS – 08	719,727.00	8,413,005.00
MS – 09 (suelo control)	719,952.00	8,413,224.00

Nota. Desarrollo propio.

Figura 7

Mapa de muestreo de suelo para el desarrollo de la fitorremediación.



Nota. Desarrollo propio.

4.5.2.2.1. Toma de muestras

Para la toma de muestras de los nueve puntos de muestreo, se procedió a realizar calicatas a una profundidad de 0 – 10 cm (capa de contacto de contaminantes). Finalmente se realizó la homogenización de las submuestras, posteriormente se pasó a realizar la

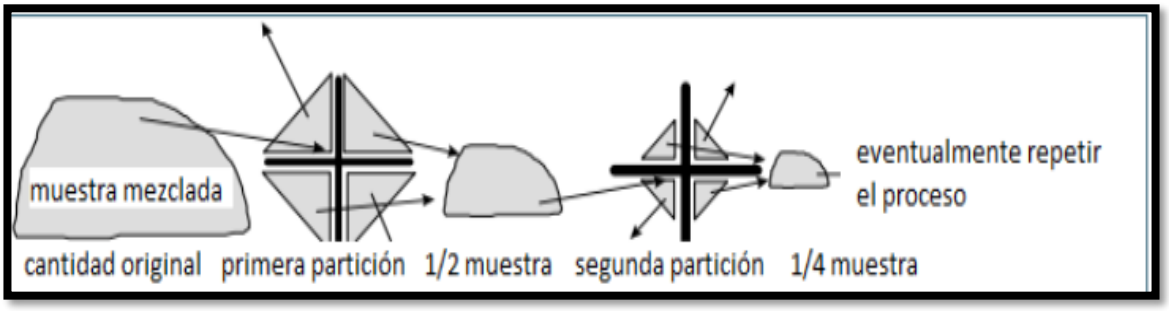
técnica del cuarteo, para obtener la submuestra representativa de acuerdo a lo indicado en la guía de muestreo de suelos y la guía para la Descontaminación de suelos, Aprobado mediante la Resolución Ministerial N°085-2014-MINAM (MINAM, 2014).

Nota: La toma de muestras se realizaron a una profundidad de 10 cm, que es la profundidad de la capa contacto con el contaminante es decir con el suelo contaminado con cobre por residuos mineros; estos suelos contaminados fueron llevados a la capa superficial por factores climáticos como la erosión por el viento y también por el agua de escorrentía.

La raíz del tarwi puede crecer considerablemente, pero el crecimiento puede variar según las condiciones de la calidad del suelo, si las condiciones son óptimas pueden alcanzar una profundidad significativa es decir hasta 50 cm. En este caso presenta un suelo contaminado con cobre por residuos mineros lo que el desarrollo y crecimiento de la raíz no es significativa.

Figura 8

Técnica de cuarteto.



Nota. Extraído de Guía de muestreo de suelos MINAM (2013).

Para el muestreo del suelo se utilizó los siguientes materiales:

- **GPS**: Se utilizó el GPS para la ubicación de los puntos de muestreo de suelos.
- **Pico:** Se utilizó el pico para realizar las calicatas de cada punto de muestreo de suelos.

- **Pala de plástico:** Se utilizó una pala de plástico para la extracción de las muestras.
- **Bolsas ziploc:** Se utilizó las bolsas ziploc para el almacenar las muestras de suelo de cada punto de muestreo.
- **Cooler:** Se utilizó un cooler para el adecuado almacenamiento de las muestras, el cual evitó el deterioro de las muestras.
- **EPP:** Se utilizo los equipos de protección personal para evitar el contacto directo con el contaminante.

4.5.2.2.2. Manejo de las muestras, materiales, transporte y etiquetado

Las muestras de suelo se procedieron a embazar en bolsas ziploc de 1kg, luego se rotuló debidamente. Las muestras fueron transportadas en un cooler, el cual evitó el deterioro asegurando la completa inmovilidad de las muestras que las contienen durante el transporte.

Cada muestra se rotuló con la siguiente información:

- Número de identificación de muestra.
- Lugar de muestreo.
- Fecha y hora del muestreo.
- Nombre de la persona que toma la muestra.

4.5.2.3. Proyección experimental del tarwi (*Lupinus mutabilis Sweet*)

Las semillas de tarwi se obtuvo de tiendas Agroveterinarias.

Para la proyección experimental del tarwi se detalla el procedimiento:

- Se adquirió 16 macetas con dimensiones de: altura de 20 cm y con diámetro de 20 cm.

Figura 9

Maceta para el desarrollo de la fitorremediación.

Nota. Desarrollo propio.

- ✓ **Germinación del tarwi:**
  - Se germinó 16 semillas de tarwi en bolsas de polietileno negro, se aplicó bioestimulante BIOSOLNEW, para su adecuado crecimiento antes del trasplante a las macetas.

    Nota: El bioestimulante solo fue aplicado en el proceso de germinación de las semillas.
  - Luego las 16 plántulas se colocaron en los maceteros para su adecuado crecimiento.
- ✓ **Trasplante de las plántulas de tarwi:**
  - Luego de que el tarwi alcanzó un tamaño máximo de 20cm, se escogió 8 plántulas de tarwi con las mejores características para sobrevivir, como el tamaño, abundancia de follaje de tallo y hojas desarrolladas.
  - Las plántulas de tarwi fueron trasplantadas en cada maceta con suelo contaminado con cobre; con el mayor cuidado para no dañar la raíz.
  - Se realizó un registro manual de una observación constante de los cambios físicos como el tamaño del tarwi y el número de hojas.
- ✓ **Riego**

Una vez trasplantado las plantas de tarwi a las macetas, se regó tres veces por semana, por las noches; la cantidad de agua por maceta fué de 500 mml.

- ✓ **Toma de datos de temperatura:**

Se instaló un termómetro ambiental y se tomó los datos de temperatura, las cuales se registraron semanalmente de forma manual.

- ✓ **Recolección de muestras de suelo y planta después de la experimentación para su análisis en laboratorio**
  - Una vez cumplido el tiempo de exposición de tres meses de experimentación, se retiraron las muestras de las macetas. Solo cuatros muestras mostraron las condiciones para poder ser analizadas.

    Nota: El diseño experimental fue planificado inicialmente considerando la fenología de la planta, las condiciones ambientales y la duración típica necesaria para observar los efectos deseados. Así mismo otros estudios preliminares como Diaz et al. (2019), indicaron que este periodo era suficiente para observar cambios significativos en el desarrollo del tarwi y en la reducción de la concentración de cobre en el suelo.
  - Las muestras de suelo se colocaron en una bolsa ziploc individual, que fueron etiquetadas para su posterior análisis en el Laboratorio Pacific Control.
  - Para el caso de las plántulas de tarwi se midió con una regla el tamaño de cada planta, así mismo se contabilizó el número de hojas. Luego se realizó la separación de la estructura vegetativa del tarwi raíces, tallos y hojas. Cada muestra se empaquetó en papel y luego se colocó en la bolsa ziploc individualmente con el rotulado correspondiente para su posterior análisis en el Laboratorio Pacific Control.

- ✓ **Para la selección de muestras de las plántulas de tarwi, se tomó en cuenta lo siguiente:**

Criterios de inclusión:

- Aquellos que presentaron un buen tamaño, estructura vegetativa completa (hojas, tallo y raíz).

Criterios de exclusión

- No formaron parte de la investigación aquellos parámetros que no aportaron significancia en el análisis como hojas podridas, hojas dañadas y tallos dañados, durante el proceso de experimentación.

4.6. Análisis de datos

Los datos obtenidos se sometieron al procesamiento estadístico SPSS para datos vinculados, esto se llevó a cabo para verificar las hipótesis de la investigación, ya que las muestras de este tratamiento fueron analizadas tanto antes como después del tratamiento de la fitorremediación.

Los datos obtenidos se sometieron a la prueba T-student para datos relacionados con el propósito de validar las hipótesis de la investigación, ya que las muestras de este tratamiento fueron evaluadas tanto antes como después del tratamiento de la fitorremediación.

Así mismo, se realizó la prueba Tukey para llevar a cabo comparaciones entre los tratamientos, con el objetivo de identificar diferencias significativas entre ellos

- Para demostrar la capacidad de fitorremediación del tarwi, se tomó como aspecto los resultados del análisis de los objetivos específicos.
- La metodología que ayudó a determinar la concentración de cobre en el suelo contaminado fue a través del uso de la espectrofotometría de absorción atómica,

lo que permitió cuantificar la concentración de cobre, para luego hacer una comparación entre la concentración de cobre inicial y final en el suelo.

- Los análisis que se realizaron en el laboratorio de la escuela profesional de Ingeniería Ambiental y Recursos Naturales, fueron el análisis de pH y la CE., del suelo contaminado con cobre inicial y final para luego de ello realizar una comparación.
- La metodología que ayudó a determinar la concentración de cobre en la estructura vegetativa (hojas, tallos y raíces), fue a través del uso de la espectrofotometría de absorción atómica, lo que permitió cuantificar la concentración de cobre, para luego hacer una comparación entre la concentración de cobre inicial y final en la estructura vegetativa del tarwi.
- Para demostrar la variación de los cambios físicos en la estructura vegetativa, se realizó un registro de la estructura vegetativa del tarwi (hojas y tallo) al inicio y al final del tratamiento, como la medición del tamaño y la cantidad de hojas.
- Para la determinación de cobre tanto en suelo y plántulas de tarwi se enviaron a analizar a un laboratorio de Lima acreditado por el INACAL el laboratorio Pacific Control. Así mismo se aplicó el análisis estadístico SPSS para la comparación al inicio y al final del tratamiento de fitorremediación.

4.7. Consideraciones éticas

Para el desarrollo de la investigación se tuvo en cuenta las siguientes consideraciones éticas:

- Se tuvo un manejo adecuado del suelo contaminado, a fin de evitar contaminar otras áreas.
- Se evitó causar algún impacto ambiental en la etapa de experimentación.
- Se respetó la información de los autores mencionados, tomando como guía el contenido de la información, así mismo se empleó citas para todas las fuentes extraídas de otras investigaciones.

- Se evitó la presentación de datos falsos, así como el manejo inapropiado de procedimientos experimentales y tratamientos de datos con el fin de exponer solo resultados deseados.
- La investigación se realizó bajo la estructura que indica la universidad.

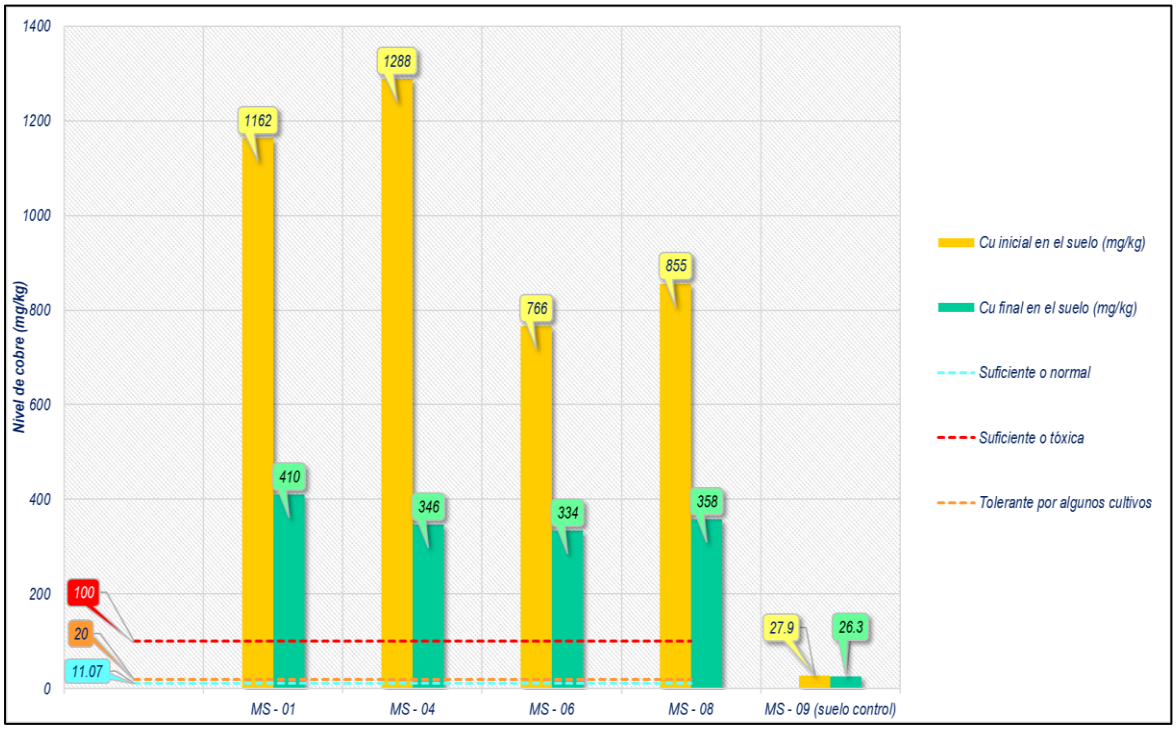
V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Resultados

5.1.1. Concentración de cobre en el suelo

Figura 10

Concentración de cobre en el suelo.



Nota. Desarrollo propio.

En la figura 10, se observa que en las cuatro muestras de suelos contaminadas y homogenizadas presentaron concentraciones iniciales de cobre que variaron entre 1162 mg/kg, 1268 mg/kg, 766 mg/kg, y 855 mg/kg; esto indica que el suelo inicial es toxico, de acuerdo a lo mencionado por Kabata (2000), donde indica que en un rango de 20 – 100 mg/kg son suelos tóxicos.

Por otro lado, se puede observar que el suelo control presenta una concentración inicial de cobre de 27.79 mg/kg.

Después del tratamiento con las plántulas de tarwi, se observó una disminución altamente significativa en la concentración de cobre en el suelo, con una disminución a 410 mg/kg en la MS-01, la muestra con mayor disminución de cobre fue a 346 mg/kg en la MS-

04, mientras que en la MS-06 mostró una disminución a 334 mg/kg, en la MS-08 tuvo una concentración final de 358 mg/kg y la muestra de suelo de suelo control disminuyo a 26.3 mg/kg.

Tabla 7

Concentración de cobre en el suelo.

Análisis cobre en el suelo	Cu inicial en el suelo (mg/kg)	Cu final en el suelo (mg/kg)	Reducción de cobre en el suelo (mg/kg) Cu= Cu inicial – Cu final	Nivel de reducción de concentración de cobre en el suelo
MS - 01	1162	410	752	Alto
MS - 04	1288	346	942	Alto
MS - 06	766	334	432	Medio
MS - 08	855	358	497	Medio
MS - 09 (suelo control)	27.9	26.3	1.6	Bajo

Nota. Desarrollo propio.

La tabla 6, muestra los resultados de análisis de concentración de cobre en el suelo inicial y final; así mismo muestra la reducción de cobre en el suelo donde se clasificaron en niveles altos, medios y bajos.

Las muestras MS – 01 y MS – 04, muestran altas concentraciones iniciales de cobre en el suelo, mostrando una reducción significativa luego del tratamiento con el tarwi.

Las muestras MS – 06 y MS – 08, muestran concentraciones iniciales medias de cobre en el suelo, donde también mostraron una disminución considerable en los niveles de cobre luego del tratamiento con el tarwi.

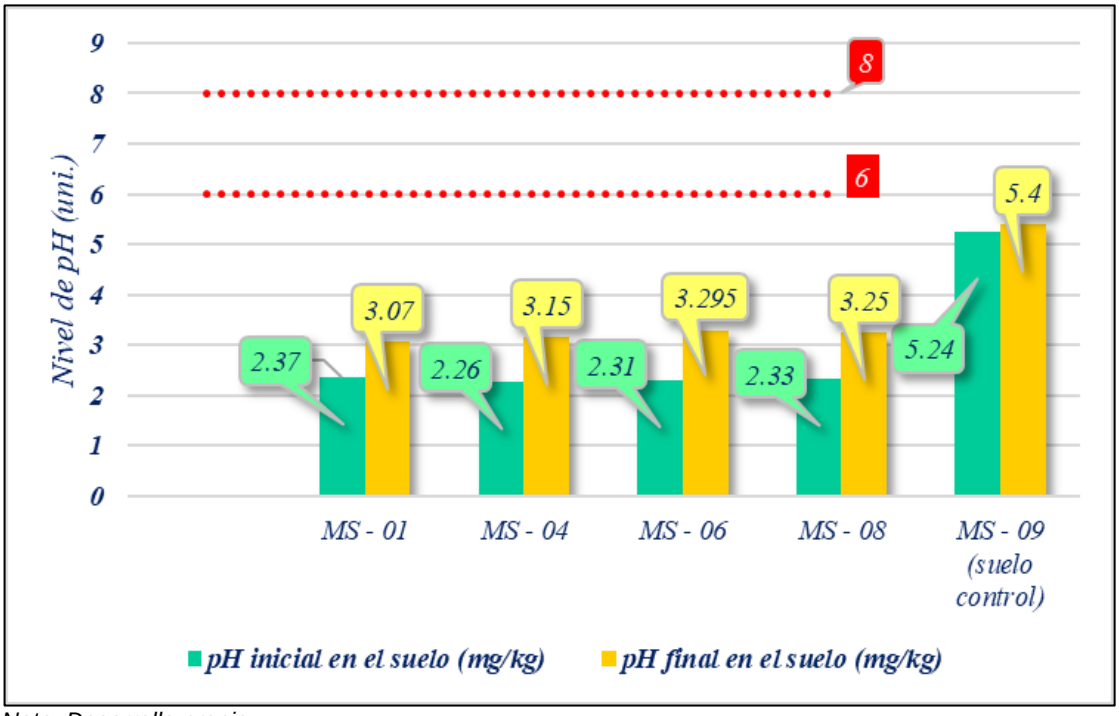
La muestra MS - 09 (suelo control), presento concentraciones bajas tanto inicial y final de cobre en el suelo.

Estos resultados indican claramente que la presencia de las plántulas de tarwi tuvo un impacto positivo en la reducción de la concentración de cobre en el suelo contaminado, lo que sugiere un efecto positivo de la fitorremediación en la recuperación de la calidad del suelo.

5.1.2. pH del suelo

Figura 11

pH del suelo.



Nota. Desarrollo propio.

En la figura 11, se observa claramente el nivel de pH del suelo en las muestras iniciales que es extremadamente acido a comparación de la MS-09 (suelo control) que es moderadamente acido.

Como se observa el tarwi redujo la acidez del suelo contaminado, después del tratamiento se observó que el pH incremento en las 05 muestras.

Los valores del Ph se interpretaron utilizando dos referencias principales:

- Según las Directrices Canadienses de Calidad Ambiental (Canadian Soil Quality Guidelines), indica que el rango de pH para suelo agrícola esta entre 6 a 8.
- Según la escala de valor de pH de la FAO (ver figura 6): según los suelos se clasifican en:

No apto: pH < 4 (suelos extremadamente ácidos) y pH > 9 (suelos extremadamente alcalinos).

Menos apto: pH 4 - 5.5 (suelos moderadamente ácidos) y pH 8 – 9 (suelos moderadamente alcalinos).

Apto: pH 5.5 – 7.5.

Tabla 8

pH del suelo.

Muestras	pH inicial en el suelo	pH final en el suelo	Clasificación del pH inicial (FAO)	Clasificación del pH final (FAO)	Directrices Canadienses de Calidad Ambiental
MS - 01	2.37	3.07	No apto	No apto	No apto
MS - 04	2.26	3.15	No apto	No apto	No apto
MS - 06	2.31	3.295	No apto	No apto	No apto
MS - 08	2.33	3.25	No apto	No apto	No apto
MS - 09 (suelo control)	5.24	5.4	Menos apto	Menos apto	No apto

Nota. Desarrollo propio.

De acuerdo a la tabla 7, los valores iniciales de pH para las muestras (MS – 01, MS – 04, MS – 06 y MS – 08), se encontraban en un rango de 2.26 a 2.37, indicando una acidez extrema según la clasificación de la FAO y las Directrices Canadienses de Calidad Ambiental.

Después del tratamiento de fitorremediación, los valores de pH aumentaron ligeramente oscilando entre 3.07 a 3.295, por lo cual son no aptos.

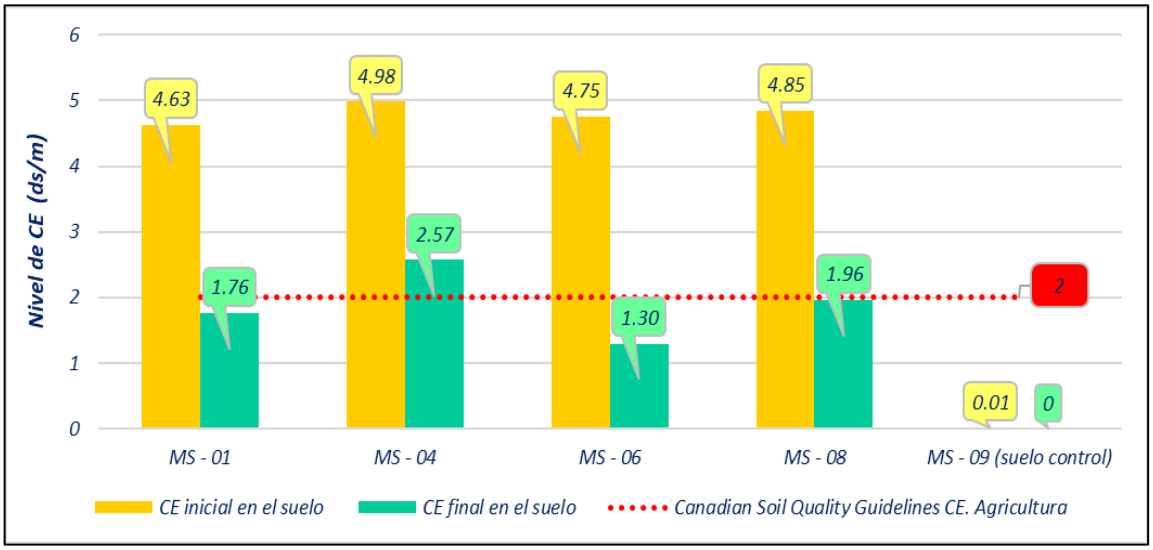
El suelo control presentó un pH inicial de 5.24 y final de 5.4, clasificándose como menos apto (moderadamente ácido) según la FAO y también como no apto según las Directrices Canadienses de Calidad Ambiental.

Este resultado sugiere que, a pesar de la mejora en el pH del suelo gracias al tratamiento, este aún podría no ser completamente adecuado para el crecimiento de la planta.

5.1.3. Conductividad Eléctrica (CE) del suelo

Figura 12

Conductividad Eléctrica (CE) del suelo.



Nota. Desarrollo propio.

En la figura 12, se evidencia que la conductividad eléctrica inicial del suelo supera los 2 ds/m, lo que señala que se trata de un suelo con niveles de salinidad que exceden los estándares de calidad de suelo según las Directrices Canadienses de Calidad Ambiental (Canadian Soil Quality Guidelines), a comparación de la MS-09 (suelo control) que es un suelo libre de sales.

Así mismo la conductividad final del suelo disminuyó, los resultados presentan un valor por debajo de 2ds/m, lo que indica que están dentro del valor establecido de las Directrices Canadienses de Calidad Ambiental (Canadian Soil Quality Guidelines).

Los valores de la CE se interpretaron utilizando dos referencias principales:

- Según las Directrices Canadienses de Calidad Ambiental (Canadian Soil Quality Guidelines), indica un valor óptimo de 2ds/m.
- Según Soriano (2018), clasifica la salinidad de los suelos según la conductividad eléctrica:

  No salino: < 2 ds/m

Ligeramente salino: 2 - 4 ds/m

Salino: 4 – 8 ds/m

Muy salino: >8 ds/m

Tabla 9

Conductividad eléctrica (CE) del suelo.

Muestras	CE inicial en el suelo (ds/m)	CE final en el suelo (ds/m)	Clasificación de la CE inicial (Soriano, 2018)	Clasificación de la CE final (Soriano, 2018)	Directrices Canadienses de Calidad Ambiental
MS - 01	4.63	1.76	Salino	No salino	Dentro del valor óptimo
MS - 04	4.98	2.57	Salino	Ligeramente salino	Fuera del valor óptimo
MS - 06	4.75	1.3	Salino	No salino	Dentro del valor óptimo
MS - 08	4.85	1.96	Salino	No salino	Dentro del valor óptimo
MS - 09 (suelo control)	0.01	0	No salino	No salino	Dentro del valor óptimo

Nota. Desarrollo propio.

Los valores iniciales de la CE variaron entre 0.01 a 4.98 (ds/m).

Después de la fitorremediación, los valores de la CE disminuyeron en la mayoría de las muestras, indicando una reducción en la salinidad del suelo.

Las muestras (MS – 01, MS – 06 y MS – 08), inicialmente se clasificaron como suelos salinos, luego del tratamiento se clasificó como suelos no salinos, los cuales estuvieron dentro del valor óptimo según las Directrices Canadienses de Calidad Ambiental.

La muestra (MS – 04), inicialmente presentó un suelo salino, después del tratamiento redujo la salinidad pasando a ligeramente salino, el cual estuvo fuera del valor óptimo según las Directrices Canadienses de Calidad Ambiental.

La muestra (MS - 09 (suelo control), se mantuvo en la clasificación como no salino y estuvo dentro del valor óptimo según las Directrices Canadienses de Calidad Ambiental.

La fitorremediación con el tarwi, ayudó a reducir la salinidad del suelo en varias muestras, mejorando su CE y acercándolas al valor óptimo según las Directrices

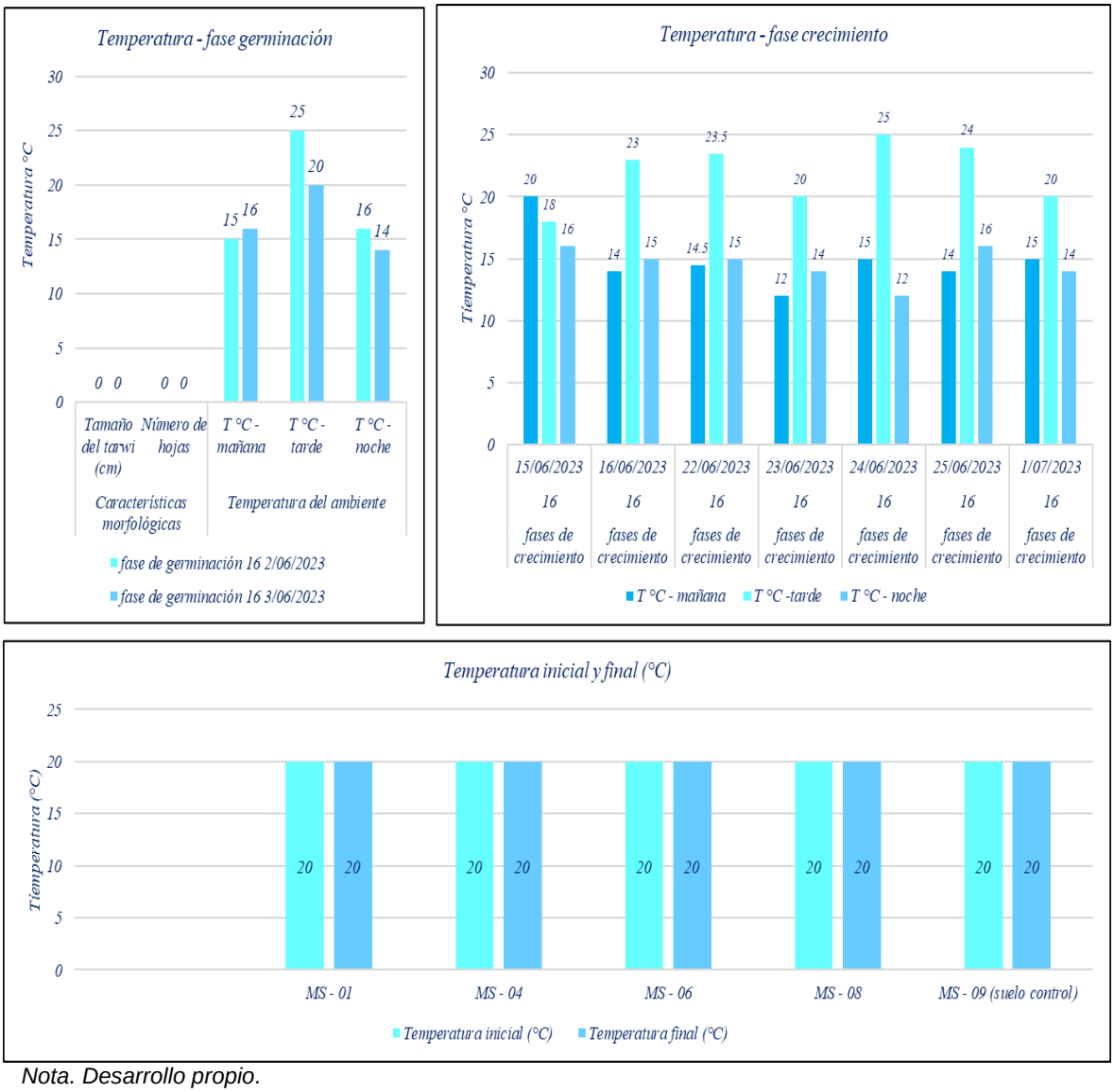
Canadienses de Calidad Ambiental, lo que sugiere la efectividad del tarwi en mejorar la calidad del suelo salino.

5.1.4. Temperatura (°C)

La temperatura registrada durante la etapa experimental del proyecto, promediándose y obteniendo un valor de 20°C inicial y 25 °C final, es crucial considerar la temperatura para el crecimiento de la planta, debido a que el tarwi puede adaptarse a diferentes rangos de temperatura, tanto en invierno como en verano.

Figura 13

Temperatura (°C)



Nota. Desarrollo propio.

En la figura 13, se visualiza las temperaturas durante la fase de germinación, durante la fase de crecimiento, y la temperatura inicial y final.

Se puede observar que la temperatura en la fase de germinación las temperaturas mínimas eran en la mañana y en la noche, que variaban entre 14 °C a 16 °C, mientras que la temperatura máxima se daba en la tarde con temperaturas entre 20 °C a 25 °C.

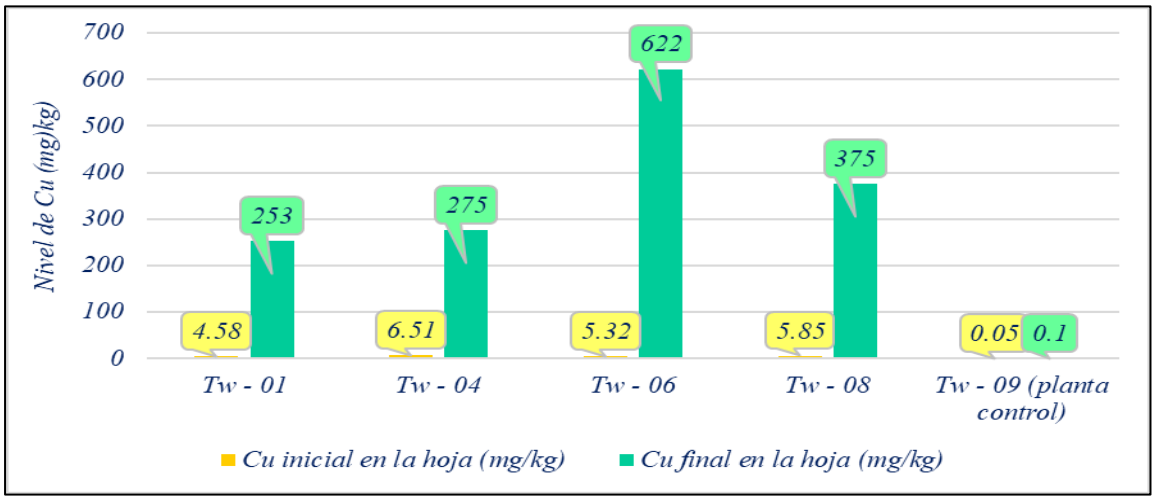
En la fase de crecimiento las temperaturas variaban de 12 °C a 25 °C. Las temperaturas mínimas se mostraban en las noches de 12 °C a 16 °C, las temperaturas medias se mostraban en las mañanas de 12 °C a 20 °C y las temperaturas máximas se mostraban en las tardes de 18 °C a 25 °C.

La temperatura inicial y final mostraban una temperatura de 20 °C, lo cual mostraba una temperatura constante.

5.1.5. Concentración de cobre en hojas de tarwi

Figura 14

Concentración de cobre en hojas de tarwi.



Nota. Desarrollo propio.

La figura 14 muestra que las concentraciones iniciales de cobre en las cinco muestras eran mínimas. Sin embargo, después del tratamiento, se observó un notable incremento en la acumulación de cobre en las hojas de tarwi. Las concentraciones de cobre en las hojas aumentaron significativamente, registrando valores de 253 mg/kg, 275 mg/kg,

622 mg/kg, 375 mg/kg y 0.1 mg/kg en comparación con la planta de control. Este aumento en la acumulación de cobre en las hojas demuestra el efecto positivo del tratamiento del tarwi en términos de acumulación del cobre.

Tabla 10

Concentración de cobre en hojas de tarwi.

Análisis cobre en el tarwi	Cu inicial en las hojas del tarwi (mg/kg)	Cu final en las hojas del tarwi (mg/kg)	Concentración de cobre en las hojas del tarwi (mg/kg) Cu= Cu final - Cu inicial	Nivel de concentración de cobre en las hojas del tarwi
Tw - 01	4.58	253	248.42	Medio
Tw - 04	6.51	275	268.49	Medio
Tw - 06	5.32	622	616.68	Alto
Tw - 08	5.85	375	369.15	Medio
Tw - 09 (planta control)	0.05	0.1	0.05	Bajo

Nota. Desarrollo propio.

La tabla 9, muestra los resultados de análisis de concentración de cobre en las hojas del tarwi inicial y final; así mismo muestra la concentración de cobre en las hojas del tarwi donde se clasificaron en niveles altos, medios y bajos.

La muestra (Tw – 06), muestra alta concentración de cobre en las hojas después del tratamiento de fitorremediación.

Las muestras (Tw – 01, Tw – 04 y Tw – 08), muestran concentraciones medias de cobre en las hojas, luego del tratamiento con el tarwi.

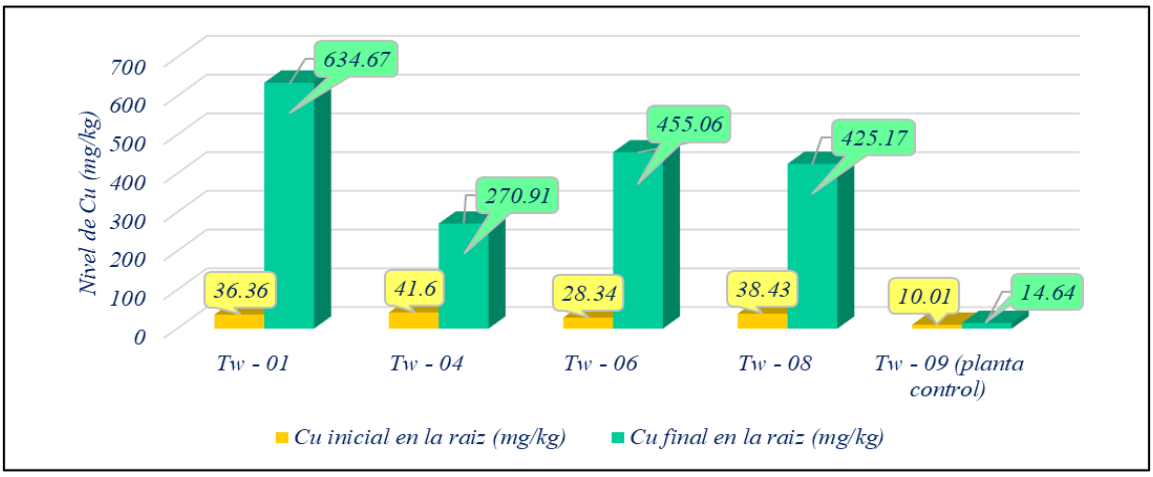
La muestra Tw - 09 (planta control), presento concentraciones bajas tanto inicial y final de cobre en la hoja del tarwi.

Estos resultados indican claramente que la presencia de las plántulas de tarwi tuvo un impacto positivo en la concentración de cobre en las hojas luego del tratamiento de fitorremediación.

5.1.6. Concentración de cobre en raíces de tarwi

Figura 15

Concentración de cobre en raíces de tarwi.



Nota. Desarrollo propio.

Como se evidencia en la Figura 15, se observan los valores iniciales de cobre en las raíces de las plantas de tarwi, los cuales oscilaban entre 36.36 mg/kg, 41.6 mg/kg, 28.34 mg/kg, 38.43 mg/kg y 10.01 mg/kg. No obstante, tras la aplicación del tratamiento, se produjo un sustancial aumento en la acumulación de cobre en las raíces de tarwi. Los valores resultantes variaron entre 634.67 mg/kg, 270.91 mg/kg, 455.06 mg/kg y 425.17 mg/kg de cobre, en contraste con la planta de control, que acumuló solamente 14.64 mg/kg de este mineral.

Tabla 11

Concentración de cobre en raíces de tarwi.

Análisis cobre en el tarwi	Cu inicial en las raíces del tarwi (mg/kg)	Cu final en las raíces del tarwi (mg/kg)	Concentración de cobre en las raíces del tarwi (mg/kg) Cu= Cu final - Cu inicial	Nivel de concentración de cobre en las raíces del tarwi
Tw - 01	36.36	634.67	598.31	Alto
Tw - 04	41.6	270.91	229.31	Medio
Tw - 06	28.34	455.06	426.72	Alto
Tw - 08	38.43	425.17	386.74	Medio
Tw - 09 (planta control)	10.01	14.64	4.63	Bajo

Nota. Desarrollo propio.

La tabla 10, muestra los resultados de análisis de concentración de cobre en las raíces del tarwi inicial y final; así mismo muestra la concentración de cobre en las raíces del tarwi donde se clasificaron en niveles altos, medios y bajos.

Las muestras (Tw – 01 y Tw – 06), muestran altas concentración de cobre en las raíces después del tratamiento de fitorremediación.

Las muestras (Tw – 04, y Tw – 08), muestran concentraciones medias de cobre en las raíces, luego del tratamiento con el tarwi.

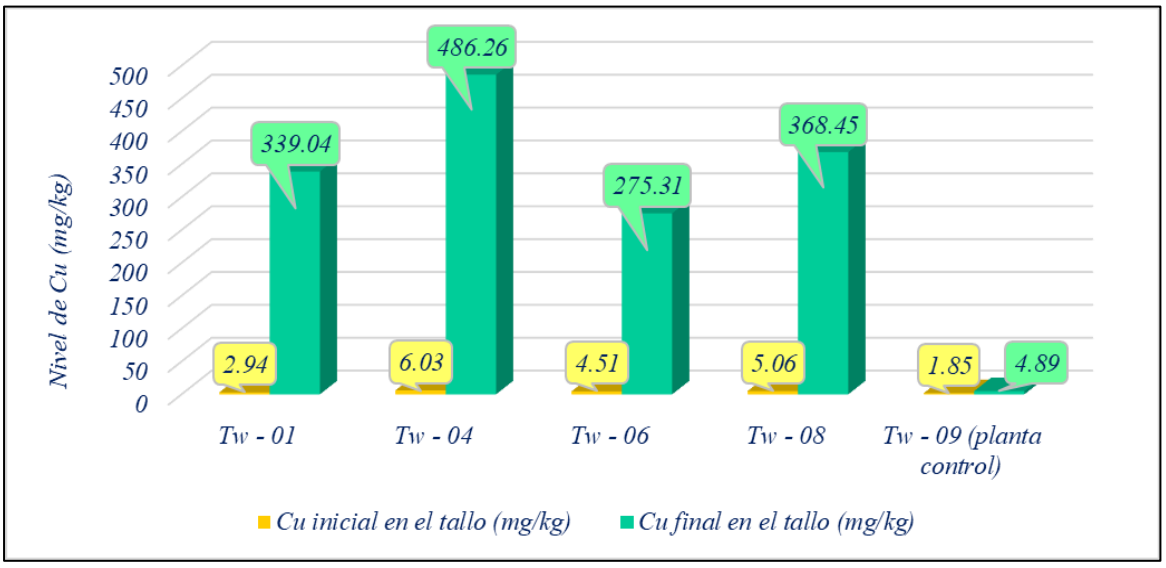
La muestra Tw - 09 (planta control), presento concentraciones bajas tanto inicial y final de cobre en la raíz del tarwi.

Estos resultados indican claramente que la presencia de las plántulas de tarwi tuvo un impacto positivo en la concentración de cobre en las raíces luego del tratamiento de fitorremediación.

5.1.7. Concentración de cobre en el tallo de tarwi

Figura 16

Concentración de cobre en el tallo de tarwi.



Nota. Desarrollo propio.

De acuerdo con los datos presentados en la Figura 16, se aprecia una variación en los niveles iniciales de cobre en los tallos de las plantas de tarwi, que oscilan entre 2.94 mg/kg, 6.03 mg/kg, 4.51 mg/kg, 5.06 mg/kg y 1.85 mg/kg. Sin embargo, tras la implementación del tratamiento experimental, se registra un notorio incremento en la acumulación de cobre en los tallos de tarwi. Los valores resultantes se sitúan en un rango de 339.04 mg/kg, 486.26 mg/kg, 275.31 mg/kg y 368.45 mg/kg de cobre, en contraste con la planta de control, que acumula solamente 4.89 mg/kg de este elemento.

Tabla 12

Concentración de cobre en el tallo de tarwi.

Análisis cobre en el tarwi	Cu inicial en el tallo del tarwi (mg/kg)	Cu final en el tallo del tarwi (mg/kg)	Concentración de cobre en el tallo del tarwi (mg/kg) Cu= Cu final - Cu inicial	Nivel de concentración de cobre en el tallo del tarwi
Tw - 01	2.94	339.04	336.1	Medio
Tw - 04	6.03	486.26	480.23	Alto
Tw - 06	4.51	275.31	270.8	Medio
Tw - 08	5.06	368.45	363.39	Medio
Tw - 09 (planta control)	1.85	4.89	3.04	Bajo

Nota. Desarrollo propio.

La tabla 11, muestra los resultados de análisis de concentración de cobre en el tallo del tarwi inicial y final; así mismo muestra la concentración de cobre en el tallo del tarwi donde se clasificaron en niveles altos, medios y bajos.

La muestra (Tw – 04), muestra alta concentración de cobre en el tallo después del tratamiento de fitorremediación.

Las muestras (Tw – 01, Tw – 06 y Tw – 08), muestran concentraciones medias de cobre en el tallo, luego del tratamiento con el tarwi.

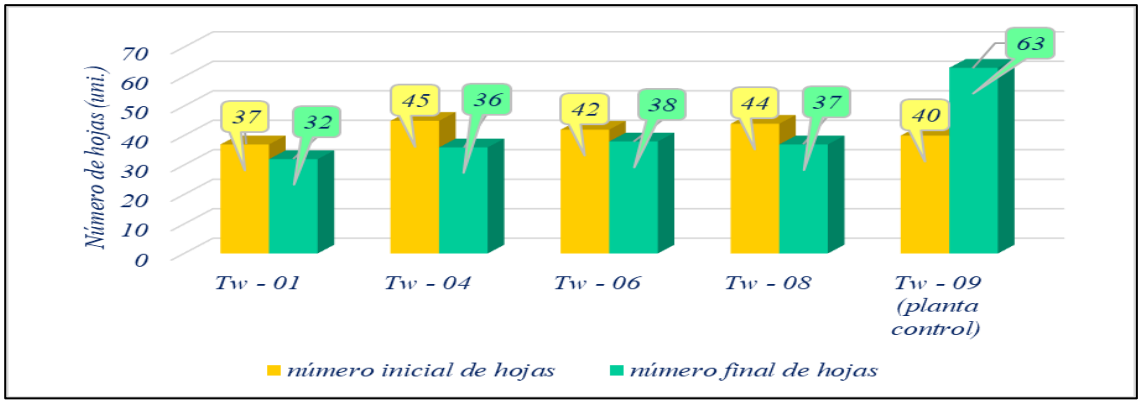
La muestra Tw - 09 (planta control), presento concentraciones bajas tanto inicial y final de cobre en el tallo del tarwi.

Estos resultados indican claramente que la presencia de las plántulas de tarwi tuvo un impacto positivo en la concentración de cobre en el tallo luego del tratamiento de fitorremediación.

5.1.8. Cantidad de hojas del tarwi

Figura 17

Cantidad de hojas del tarwi.



Nota. Desarrollo propio.

La Figura 17 pone de manifiesto una observación importante: inicialmente, las plantas de tarwi presentaban un mayor número de hojas, oscilando entre 37 y 40 hojas por planta. Sin embargo, tras el trasplante para llevar a cabo el tratamiento experimental, se observó una disminución significativa en el número de hojas. En contraste, las plantas de control desarrollaron sus hojas con normalidad.

Tabla 13

Cantidad de hojas del tarwi.

Tarwi	Número inicial de hojas	Número final de hojas
Tw - 01	37	32
Tw - 04	45	36
Tw - 06	42	38
Tw - 08	44	37
Tw - 09 (planta control)	40	63

Nota. Desarrollo propio.

Al analizar la cantidad de hojas de las plantas de tarwi inicial y final del tratamiento de fitorremediación, observamos que las plantas sometidas a la fitorremediación

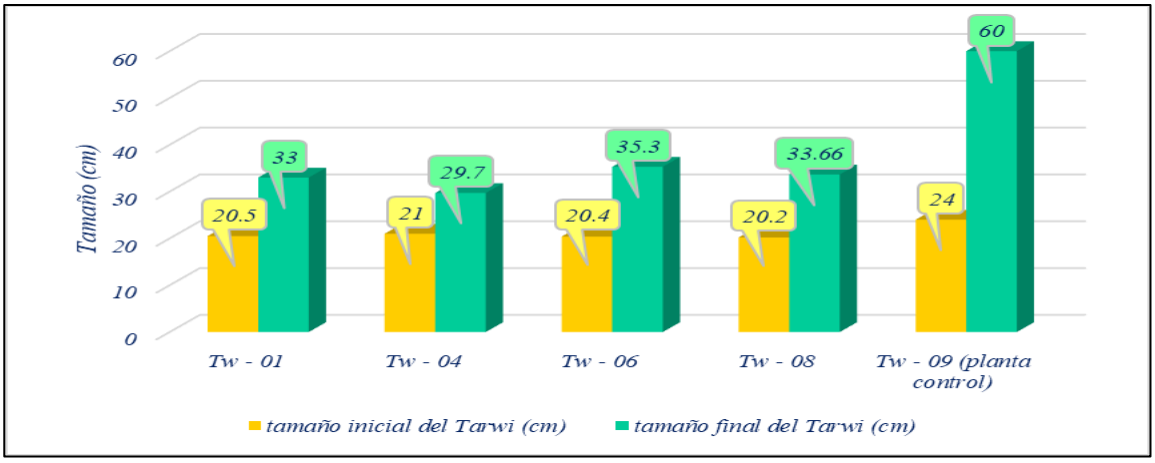
presentaron una disminución de las hojas. En contraste, la planta control mostró un incremento en el número de hojas durante el mismo periodo.

Esta reducción en la cantidad de hojas se atribuye a las condiciones adversas del suelo contaminado, que no proporcionaba un entorno adecuado para el crecimiento de las plantas.

5.1.9. Tamaño del tarwi

Figura 18

Tamaño del tarwi.



Nota. Desarrollo propio.

En la Figura 18, se aprecia que el tamaño inicial de las plantas de tarwi oscilaba entre 20.4 cm y 24 cm por planta. No obstante, tras la aplicación del tratamiento experimental, se observó un notable incremento en el tamaño de las plantas de tarwi. Estos aumentos de tamaño se situaron en un rango de 33 cm, 29.7 cm, 35.3 cm y 33.66 cm por planta. Sin embargo, es importante destacar que, en comparación con las plantas de control, el crecimiento de las plantas de tarwi sometidas al tratamiento de fitorremediación fue considerable.

Tabla 14

Tamaño del tarwi

Tarwi	Tamaño inicial del Tarwi (cm)	Tamaño final del Tarwi (cm)
Tw - 01	20.05	33
Tw - 04	21	29.7
Tw - 06	20.4	35.3
Tw - 08	20.2	33.66
Tw - 09 (planta control)	24	60

Nota. Desarrollo propio.

Al analizar los resultados de la tabla 13, observamos que las plantas de tarwi sometidas al tratamiento de fitorremediación mostraron un crecimiento significativo después del tratamiento en comparación con la planta control que mostró un crecimiento muy significativo.

5.2. Discusión de resultados

- Los resultados muestran que el tarwi tiene la capacidad de fitorremediar el suelo contaminado con cobre, disminuyendo la MS-01 de 1162 mg/kg a 410 mg/kg, la MS-04 de 1288 mg/kg a 346 mg/kg, la MS-06 de 766 mg/kg a 334 mg/kg, la MS-08 de 855 mg/kg a 358 mg/kg y la MS-09 de 27.9 mg/kg a 26.3 mg/kg; lo que contrasta con Gonzales et al. (2018), indican que los niveles de cobre redujeron de 278 ppm a 124 ppm y de 293 ppm a 143ppm en los dos tratamientos usados con la especie M. sativa. Esto se corrobora con Noguez et al. (2017), quienes indican que las leguminosas son útiles para la restauración de suelos contaminados ya que acumulan altas concentraciones de metales pesados. Esto muestra que mientras mayor sea el tiempo de permanencia de la planta en el suelo, mayor será la concentración de cobre en la planta y disminuirá la concentración de cobre en el suelo.
- Después del tratamiento, se observó una variación en los parámetros químicos evaluados como el pH y la CE., en los resultados se observó que el tarwi redujo la acidez del suelo contaminado con un pH final entre MS-01 a 3.07, MS-04 a 3.15, MS-06 a 3.295, MS-08 a 3.25 y MS-09 a 5.4, así mismo la CE. Final del suelo disminuyó entre MS-01 a 1.76 ds/m, MS-04 a 2.57 ds/m, MS-06 a 1.30 ds/m, MS-08 a 1.96 ds/m y MS-09 a 0 ds/m lo cual es ligeramente salino, como indica Diaz et al. (2019), que el pH disminuye mientras mayor sea la concentración de Cd y viceversa; menciona también que la capacidad de crecimiento de las leguminosas se encuentra mejor en suelos con un pH ligeramente ácido. Sin embargo, una concentración excesiva de sales en el suelo puede dar lugar a una esterilización, afectando el desarrollo normal de la planta.
- La concentración de cobre en la raíz del tarwi fue mucho mayor que en las hojas y tallos, concentrando entre Tw-01 a 634.67 mg/kg, Tw-04 a 270.91 mg/kg, Tw-06 a 455.06 mg/kg y Tw-08 a 425.17 mg/kg, en las hojas concentró entre Tw-01 a 253 mg/kg, Tw-04 a 275 mg/kg, Tw-06 a 622 mg/kg y Tw-08 a 375 mg/kg; y en el tallo fue entre Tw-01 a 339.04 mg/kg, Tw-04 a 486.26 mg/kg, Tw-06 a 275.31 mg/kg y Tw-08

a 368.45 mg/kg; lo que contrasta Noguez et al. (2017), quienes describen que la especie S. virgata presenta una mayor concentración de cobre en la raíz con un resultado de 500 mg/kg; así mismo Peña et al. (2014), indica que la especie L. ballianus tuvo una mayor acumulación en la raíz con un promedio de 287.3 mg/Kg de Cd; sin embargo, Duarte et al. (2020), indica que la mayor concentración de cobre se da en las hojas de la especie P. laevigata con 52.46 mg/kg. Esto se debe a que la raíz al estar en contacto con el suelo absorbe con mayor facilidad los metales pesados.

- Durante el periodo de tres meses de tratamiento, el tarwi obtuvo un crecimiento entre Tw-01 a 33 cm, Tw-04 a 29.7 cm, Tw-06 a 35.3 cm y Tw-08 a 33.66 cm, con un promedio de 32 a 38 hojas por cada planta de tarwi en el tratamiento, a comparación de la planta control con un crecimiento de 60 cm y una cantidad de 63 hojas; la disminución de hojas y la deficiencia en el desarrollo del tarwi durante el tratamiento fue debido a la alta concentración de cobre en el suelo, lo que contrasta con Diaz et al. (2019), que indica que en el tratamiento T1 el tarwi tuvo un crecimiento de 35.23 cm sin embargo en el tratamiento T4 hubo deficiencia en el desarrollo de la planta con un crecimiento de 13.30 cm, durante un periodo de 80 días. Demostrando que a mayor concentración del metal pesado menor es el desarrollo del tarwi.

5.3. Prueba de hipótesis

5.3.1. Prueba de hipótesis general

H1: El tarwi (*Lupinus mutabilis Sweet*), tiene la capacidad de concentrar altos niveles de cobre después del tratamiento de fitorremediación en suelos contaminados con cobre por residuos mineros, del sector de Antilla, distrito de Sabaino, Provincia de Antabamba – Apurímac, 2023.

H0: El tarwi (Lupinus mutabilis Sweet), no tiene la capacidad de concentrar altos niveles de cobre después del tratamiento de fitorremediación en suelos contaminados con cobre por residuos mineros, del sector de Antilla, distrito de Sabaino, Provincia de Antabamba – Apurímac, 2023.

Interpretación:

Por lo que se demuestra en los resultados del análisis estadístico de las pruebas de significancia de las hipótesis especifica, demostrando que el p de sig. en la concentración de cobre en las plántulas del tarwi después del tratamiento, así como la concentración de cobre en el suelo después del tratamiento de fitorremediación es menor al 5%. Por lo cual se concluye que, el tarwi si tiene la capacidad de concentrar altos niveles de cobre después del tratamiento de fitorremediación en suelos contaminados con cobre por residuos mineros.

5.3.2. Prueba de hipótesis especifica

- **Hipótesis especifica 1:**

H1: Existe una variación significativa entre la concentración inicial y final de cobre en suelos contaminados por residuos mineros del sector de Antilla, distrito de Sabaino, Provincia de Antabamba – Apurímac, 2023.

H0: No existe una variación significativa entre la concentración inicial y final de cobre en suelos contaminados por residuos mineros del sector de Antilla, distrito de Sabaino, Provincia de Antabamba – Apurímac, 2023.

Tabla 15

Pruebas estadísticas sobre la concentración de cobre en suelos contaminados.

Muestras	Prueba T de muestras emparejadas			Resumen de la Prueba de Post-Hoc HSD Tukey	
	Media	t	P de Sig.	Muestras	Media
Cobre en el suelo inicial - final	527.80000	3.359	0.014	Suelo control	27.1000
				Cobre final en el suelo	362.0000
				Cobre inicial en el suelo	1017.7500

Nota. Desarrollo propio.

Según lo observado en la tabla 18, que contiene la prueba estadística realizada, se evidencia un p de sig. menor a 0.05, al comparar las concentraciones medias de cobre en el suelo inicial y final al tratamiento con la planta fitorremediadora.

En consecuencia, se puede afirmar con un 95% de confianza que la reducción en los niveles de cobre en el suelo luego de aplicar el tratamiento con el tarwi (*Lupinus mutabilis Sweet*), no se debe al azar, sino que corresponde a un efecto real del mecanismo fitorremediador del tarwi, comprobándose así su efectividad para disminuir el cobre en suelos contaminados por residuos mineros.

- **Hipótesis especifica 2:**

H1: Se observa una variación significativa de los parámetros químicos inicial y final en suelos contaminados con cobre por residuos mineros del sector de Antilla, distrito de Sabaino, Provincia de Antabamba – Apurímac, 2023.

H0: No se observa una variación significativa de los parámetros químicos inicial y final en suelos contaminados con cobre por residuos mineros del sector de Antilla, distrito de Sabaino, Provincia de Antabamba – Apurímac, 2023.

Tabla 16

Pruebas estadísticas sobre los parámetros químicos del suelo.

Muestras	Prueba T de muestras emparejadas			Resumen de la Prueba de Post-Hoc HSD Tukey	
	Media	t	P de Sig.	Muestras	Media
pH en suelos contaminados con cobre	-0.73400	-4.857	0.004	pH inicial en el suelo	2.3175
				pH final en el suelo	3.1900
				pH Suelo Control	5.3200
CE en suelos contaminados con cobre	2.32600	3.864	0.009	CE Suelo control	.0050
				CE final en el suelo	1.8975
				CE inicial en el suelo	4.8025

Nota. Desarrollo propio.

Los resultados de la prueba estadística aplicada y presentados en la tabla 25, evidencian un p de sig. inferior al 0.05, en los parámetros químicos del suelo, específicamente pH y conductividad eléctrica.

Por lo tanto, con un 95% de confianza estadística es posible afirmar que el cambio en las características químicas del suelo luego del tratamiento no obedece al azar, sino que está asociado de forma directa con el mecanismo depurador del tarwi, valiéndose su efectividad para mejorar la calidad del suelo contaminado.

- **Hipótesis especifica 3:**

H1: Se presenta una variación significativa en la concentración inicial y final de la concentración de cobre en la estructura vegetativa del tarwi (*Lupinus mutabilis Sweet*), en suelos contaminados por residuos mineros del sector de Antilla, distrito de Sabaino, Provincia de Antabamba – Apurímac, 2023.

H0: No se presenta una variación significativa en la concentración inicial y final de la concentración de cobre en la estructura vegetativa del tarwi (*Lupinus mutabilis Sweet*), en suelos contaminados por residuos mineros del sector de Antilla, distrito de Sabaino, Provincia de Antabamba – Apurímac, 2023.

Tabla 17

Pruebas estadísticas sobre la concentración de cobre en la estructura vegetativa del tarwi (Lupinus mutabilis Sweet).

Muestras	Prueba T de muestras emparejadas			Resumen de la Prueba de Post-Hoc HSD Tukey	
	Media	t	P de sig.	Muestras	Media
Cu en hojas inicial y final	-300.55800	-3.015	0.020	Cobre en las hojas de la planta control	.0750
				Cobre inicial en las hojas	5.5650
				Cobre final en las hojas	381.2500
Cu en la raíz inicial y final	-329.14200	-3.287	0.015	Cobre en la raíz de la planta control	12.3250
				Cobre inicial en la raíz	36.1825
				Cobre final en la raíz	446.4525
Cu en el tallo inicial y final	-290.71200	-3.657	0.011	Cobre en el tallo de la planta control	3.3700
				Cobre inicial en el tallo	4.6350
				Cobre final en el tallo	367.2650

Nota. Desarrollo propio.

Según los análisis estadísticos plasmados en la tabla 35 que recoge los datos sobre concentración de cobre inicial y final del tratamiento de fitorremediación en la estructura vegetativa del tarwi, se identifica un p de sig. inferior al nivel de significancia 0.05.

Por consiguiente, con un 95% de confianza, es posible validar la reducción en los niveles de cobre dentro de la estructura del tarwi luego del tratamiento no es producto del azar, sino que se debe precisamente a la capacidad fitorremediadora demostrada por el tarwi para absorber y acumular cobre. Se comprueba así su efectividad para la fitorremediación de este contaminante en particular.

- **Hipótesis especifica 4:**

H1: Se identifican una variación significativa inicial y final de los cambios físicos en la estructura vegetativa del tarwi (*Lupinus mutabilis Sweet*), en suelos contaminados con cobre por residuos mineros del sector de Antilla, distrito de Sabaino, Provincia de Antabamba – Apurímac, 2023.

H0: No se identifican una variación significativa inicial y final de los cambios físicos en la estructura vegetativa del tarwi (*Lupinus mutabilis Sweet*), en suelos contaminados con cobre por residuos mineros del sector de Antilla, distrito de Sabaino, Provincia de Antabamba – Apurímac, 2023.

Tabla 18

Resumen de las pruebas estadísticas sobre cambios físicos en la estructura vegetativa del tarwi (Lupinus mutabilis Sweet).

Muestras	Prueba T de muestras emparejadas			Resumen de la Prueba de Post-Hoc HSD Tukey	
	Media	t	P de sig.	Muestras	Media
Cantidad de hojas inicial - final	0.40000	0.068	0.475	Cantidad final de hojas	35.7500
				Cantidad inicial de hojas	42.0000
				Cantidad de hojas en la planta control	51.5000
Tamaño del tarwi inicial - final	-17.11200	-3.541	0.012	Tamaño inicial del tarwi	20.5250
				Tamaño final del tarwi	32.9150
				Tamaño de la planta control	42.0000

Nota. Desarrollo propio.

Los resultados plasmados en la tabla 42, resumen las pruebas estadísticas aplicadas a dos dimensiones: cantidad de hojas y tamaño del tarwi. En la primera, se observa un p de sig. superior al nivel crítico 0.05 al contrastar los valores iniciales y finales luego del tratamiento de fitorremediación.

Considerando que el punto de corte se fijó en 0.05, se debe aceptar la hipótesis nula de igualdad de medias con respecto al número de hojas antes y después, descartando efecto significativo del proceso biológico en esta dimensión en particular.

En contraste, dimensión tamaño del tarwi, si evidencia diferencia estadística significativa entre las mediciones al inicio y final, permitiendo rechazar la igualdad.

Así, con un 95% de confianza, el análisis estadístico permite validar y cuantificar el impacto diferenciado de la fitorremediación sobre distintas características.

VI. CONCLUSIONES

- Los resultados de este estudio indican que el tarwi (*Lupinus mutabilis Sweet*), tiene la capacidad de concentrar altos niveles de cobre después del tratamiento de fitorremediación en suelos contaminados con cobre proveniente de residuos mineros. Se encontró que esta especie es tolerante a altas concentraciones de cobre en el suelo y es capaz de acumular cantidades considerables de este metal pesado en su estructura vegetativa.

- Se determinó la variación inicial y final de la concentración de cobre en el suelo contaminado, donde inicialmente los niveles tóxicos de cobre superaban ampliamente los valores de referencia, indicando una fuerte contaminación en la zona de estudio. No obstante, el tratamiento con tarwi logró reducir significativamente las concentraciones de cobre en todos los suelos contaminados después del periodo de fitorremediación.

- Se determinó la variación inicial y final de los parámetros químicos del suelo contaminado con cobre, donde se verificó que el uso de plántulas de tarwi tuvo efecto positivo en la mejora del pH y la reducción de la salinidad de los suelos contaminados con cobre. Estos resultados respaldan la fitorremediación como una estrategia viable para la restauración de la calidad del suelo impactado por metales pesados.

- Se determinó la variación inicial y final de la concentración de cobre en la estructura vegetativa del tarwi (*Lupinus mutabilis Sweet*). Inicialmente se encontraron concentraciones bajas en la estructura vegetativa. No obstante, después del periodo de fitorremediación, las plantas tratadas registraron aumentos significativos de las concentraciones de cobre en raíces, tallos y hojas, observándose los mayores niveles de acumulación en raíces y hojas.

- Se determinó la variación inicial y final de los cambios físicos en la estructura vegetativa del tarwi (*Lupinus mutabilis Sweet*). La exposición al suelo contaminado con cobre generó efectos adversos visibles en el número de hojas y en la altura alcanzada, restringiendo su crecimiento y desarrollo.

VII. RECOMENDACIONES

- Para optimizar los resultados de la fitorremediación utilizando tarwi, se recomienda llevar a cabo plantaciones directamente en áreas afectadas por residuos mineros. Esto permitirá replicar las condiciones naturales y potencializar la capacidad del tarwi para absorber y reducir las concentraciones de cobre en suelos contaminados. Los ensayos realizados en este estudio, efectuados en un entorno controlado como el invernadero, han mostrado resultados prometedores. Sin embargo, la implementación directa en el lugar afectado podría mejorar significativamente la efectividad de la remediación, dada la interacción con factores ambientales reales.
- Se recomienda extender el periodo de fitorremediación es crucial para maximizar la eficiencia del proceso con el tarwi. Si bien los resultados obtenidos en este estudio son prometedores, un tiempo más prolongado permitiría una mayor acumulación de cobre en la planta, optimizando la reducción de los niveles de este metal en suelos contaminados. La prolongación del tratamiento permitiría observar efectos a largo plazo, garantizando una remediación más efectiva y sostenible en entornos impactados por residuos mineros.
- Se recomienda implementar programas de restauración ambiental basados en la remediación de suelos contaminados, con el uso del tarwi, para la recuperación de terrenos degradados y la mitigación de los pasivos ambientales mineros, permitiendo la reducción de los metales pesados presentes en el suelo.
- Se recomienda implementar un laboratorio con los equipos necesarios para innovar en técnicas de restauración ambiental ofreciendo una alternativa viable y sostenible para revertir ambientes contaminados.

VIII. REFERENCIAS

Awofolu, O. R. (2005). *Levels of trace metals in water and sediment from Tyume river and its effects on an irrigated farmland. .* Water S. A. .

Baena, G. (2017). *Metodología de la investigación 3ra edición.*

Baron, F. (2004). *Apuntes de Bioestadística: Tercer ciclo en ciencias de salud y Medicina.* Málaga, España: Respositodio Digital UMA.

Bettaieb, T., & Arbaoui, S. (2018). Heavy metal accumulation in micropropagated plants of kenaf (Hibiscus cannabinus L.). *Int J Adv Sci Eng Technol*, 6, 32-33.

Branzini, A., González, R., & Zubillaga, M. (2012). Absorption and translocation of copper, zinc and chromium by Sesbania virgata. *Journal of environmental management,*, 102, 50-54.

Camarena, M., Huaringa, J., Jimenez, D., & Mostacero, N. (2012). *Revalorización de un cultivo subutilizado: Chocho o tarwi (Lupinus mutabilis Sweet).* Primera Edición. Universidad Nacional Agraria La Molina – Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica. CONCYTEC.

Canadian Environmental Quality Guidelines Canadian Council of Ministers of the Environment Canadian Soil Quality Guidelines for the Protection of Environmental and Human Health. (1999). *Interim remediation criteria for soil (mg·kg-1) that have not yet been replaced by Canadian Soil Quality Guidelines.* Obtenido de https://support.esdat.net/Environmental%20Standards/canada/soil/rev_soil_summary_tbl_7.0_e.pdf

Castañeda, N. (2022). *Bioacumulación de metales en cultivo de lupinus albus l. emergentes en suelos contaminados.* Cajamarca: Repositorio UPN. Obtenido de https://repositorio.upn.edu.pe/bitstream/handle/11537/30837/Casta%C3%B1eda%20Paredes%20Neil%20Keneet.pdf?sequence=1

Chappuis, M. (2019). *"Remediación y activación de pasivos ambientales mineros (PAM) en el Perú".* Santiago: Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).

Corrales, E. (2014). *Alternativas de disposición para la fitorremediación de suelos contaminados por actividades mineras (Doctoral dissertation, Corporación Universitaria Lasallista).* Repositorio Digital UNILASALLISTA. Obtenido de http://repository.unilasallista.edu.co/dspace/bitstream/10567/1131/1/Fitorremediacion_suelos_contaminados_actividades_mineras.pdf

Diaz, J., & Escobar, S. (2019). *Eficiencia del TARWI (Lupinus mutabilis) asistido con Bradyrhizobium sp. para la absorción de cadmio en suelos contaminados – Lima 2019.* Lima: Repositorio Institucional UCV.

Díaz, M. (2017). *Capacidad de Acumulación de la ortiga (urtica urens) para la fitorremediación de suelos contaminados con plomo en la Oroya, Junín, 2017.* Lima: Repositorio Institucional UCV.

Duarte, V., Pérez, V., Hernández, E., & Villanueva, A. (2020). Estudio exploratorio de la acumulación de plomo y cobre en Prosopis laevigata en depósitos mineros. *Ecosistemas y recursos agropecuarios*, 7(2).

Dybowska, A., Farago, M., Valsami-Jones, E., & Thornton, I. (2006). Remediation strategies for historical mining and smelting sites. Science Progress,.

FAO & PNUMA. (2022). *Evaluación Mundial de la Contaminación del suelo.* Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Obtenido de https://www.fao.org/3/cb4827es/cb4827es.pdf

FAO. (2018). Portal de Suelos de la FAO. *Organizacion de las Naciones Unidas para la Alimentacion y Agricultura*, 1.

FAO, Rodríguez N., E., McLaughlin, M., & Pennock, D. (2019). *La contaminación del suelo: una realidad oculta.* Roma: FAO.

Gamarra, L. (2018). *La minería peruana y los objetivos de desarrollo sostenible. Oportunidades y retos que plantean los ODS al sector minero y subsectores.* Lima, Perú: Consorcio de Investigación Económica y Social-CIES. Obtenido de https://minsus.net/mineria-sustentable/wp-content/uploads/2019/02/La-mineria-peruana-y-los-objetivos-de-desarrollo-sostenible.pdf

García, I., & Dorronsoro, C. (2005). Contaminación por metales pesados. *Tecnología de suelos.* Obtenido de http://edafologia. ugr. es

Gómez, M. M. (2006). *Introducción a la metodología de la investigación científica.* Editorial Brujas.

Gonzales, J., Aponte, M., Bustamante, E., & Chomba, J. (2018). Fitorremediación de un suelo contaminado con dos niveles de cobre, mediante el so del cultivo de la alfalfa “Medicago sativa. *Searching-Science*, 1 - 10.

Guzmán, A. (2021). *Fitorremediación de suelos contaminados con arsénico, cobre y plomo utilizando Echeveria elegans y Crassula ovata (Tesis de Maestría).* Ciudad de México: Respositorio Digital UAM.

Guzmán, A. (2021). *Fitorremediación de suelos contaminados con arsénico, cobre y plomo utilizando Echeveria elegans y Crassula ovata (Tesis de Maestría).* Ciudad de México: Respositorio Digital UAM.

Hernández, J. (2011). *Especiación de metales pesados contaminantes en los suelos y acuífero del río de los remedios (Doctoral dissertation).* Mexico: Repositorio digital IPN.

Hernández, R., Alvarado, A., & Romero, R. (2012). Acumulación de cobre en plantas silvestres de zonas agrícolas contaminadas con el metal. *Ciencia y Tecnología*, 28(1 y 2): 55-61.

Kabata Pendias, A. (2000). *Trace elements in soils and plants.* CRC press.

Khalid, S., Shahid, M., Niazi, NK., Murtaza, B., Bibi, I., & Dumat, C. (2017). Una comparación de tecnologías para la remediación de suelos contaminados con metales pesados. *J. Geoquimica.* , 182, 247-268.

López, M., & Morales, O. (2022). Fitorremediación de suelos contaminados por metales pesados: una revisión. *El Higo Revista Científica*, 12 (2), 15-28. Obtenido de https://doi.org/10.5377/elhigo.v12i2.15197

Maguiña, L. (2017). *Determinación de la capacidad fitorremediadora de Lupinus mutabilis Sweet "chocho o tarwi" en suelos contaminados con cadmio (Cd) [Tesis de Título,].* Lima: Respositorio Institucional Universidad Ricardo Palma. Obtenido de https://repositorio.urp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14138/910/Magui%C3%B1a_lf.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Milton, T. (2016). *Manejo de suelos ácidos de las zonas altas de Honduras: conceptos y métodos.* Tegucigalpa, Honduras: Dirección de Ciencia y Tecnología Agropecuaria (DICTA).

MINAM. (2005). Ley General del Ambiente, Ley Nº 28611. En MINAM, *Ley General del Ambiente, Ley Nº 28611* (pág. Pag. 25). LimA, Perú.

MINAM. (2014). *Guía para muestreo de suelos y guía para la elaboración de planes de descontaminacion de suelos.*

MINAM. (2015). Glosario de Términos - Sitios contaminados. 4-17.

MINEM. (2017). *Ministerio de Energía y Minas - Perú: País Minero - Minería*. Obtenido de https://www.minem.gob.pe/_detalle.php?idSector=1&idTitular=159&idMenu

Monje, A. (2011). *Metodologia de la investigación cuantitativa y cualitativa - Guía didáctica.* Colombia: Universidad Surcolombiana.

Morales , J., & Sepulveda , G. (2012). El daño por oxidacion causado por cobre y la respuesta antioxidante de las plantas. *Interciencia*, 37(11), 805-811. Obtenido de https://www.redalyc.org/pdf/339/33925550003.pdf

Moreno, L. (Ed.). (16 de diciembre de 2022). *Dialogo Chino*. Obtenido de Dialogo Chino: https://dialogochino.net/es/actividades-extractivas-es/61618-como-vamos-a-vivir-el-impacto-de-la-mineria-en-las-comunidades-del-sur-de-peru/

Mousalli, K. (2015). *Revista researchgate.* Obtenido de Métodos y diseños de investigación cuantitativa.

Nies, D. H. (1999). Microbial heavy-metal resistance. *Applied microbiology and biotechnology*, 51(6), 730-750.

Noguez, A., López, A., Carrillo, R., & González, M. (2017). Uso de leguminosas (Fabaceae) en fitorremediación. *Agroproductividad*, 10(4), 57-62. Obtenido de :https://www.researchgate.net/profile/Ma-Del-Carmen-Gonzalez-

OSINERGMIN. (2007). Panorama de la Minería en el Perú. En A. Dammert, & F. Molinelli, *Panorama de la Minería en el Perú* (págs. 1 - 198). Lima, Perú. Obtenido de https://www.osinergmin.gob.pe/seccion/centro_documental/Institucional/Estudios_Economicos/Libros/Libro_Panorama_de_la_Mineria_en_el_Peru.pdf

Osman, M. E. H., El-Feky, S. S., Elshahawy, M. I., & Shaker, E. M. (2017). Efficiency of flax (Linum usitatissimum L.) as a phytoremediator plant for the contaminated soils with heavy metals. *Int J Agric Environ Res,*, 3(4), 3577-3600.

Panoro Minerals Ltd. (2009). *Restated, Amended Technical Report for the Antilla Property.* Antilla .

Papuico, K. (2018). *Tecnica de fitorremediación en la extracción de metales pesados con la planta yaluzai (senecio rudbeckiaefolius) en la relavera de quiulacocha del distrito*

de simón bolívar de rancas (Tesis de Título). Cerro de Pasco: Repositorio Institucional UNDAC.

Paredes, P., & Rodríguez, J. (2020). *Revisión sistemática: Especies Vegetales en la fitorremediación de suelos contaminados por metales pesados.* Trujillo: Repositorio UCV.

Paz, G. M. (2014). *Metodología de la investigación.* Grupo Editorial Patria.

Peña, J., Gómez, J., Montoya, H., Chanco, M., Mariano, M., & Cano, N. (2014). Capacidad fitorremediadora de cinco especies altoandinas de suelos contaminados con metales pesados. *Revista peruana de biología*, 21(2), 145-154. Obtenido de http://www.scielo.org.pe/pdf/rpb/v21n2/a04v21n2.pdf

Pizarro, R., Flores, JP, Tapia, J., Valdés-Pineda, R., González, D., Morales, C., & León, L. (2016). Especies forestales para la recuperación de suelos contaminados con cobre debido a actividades mineras. *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente*, 22 (1), 29-43.

Rodriguez, P. (2018).E*fecto del humus de lombriz en la remediación de suelos contaminado con crudo de petróleo [tesis título].* pucallpa: Repositorio Institucional UNU.

Rosado, C., Quispe, W., Poma, Y., Quispe, M., Aguilar, S., & Mamani, V. (2023). Relación de la producción minera con la actividad agrícola y pecuaria en la región Puno, Perú. pp. 193 - 208. doi:https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v7i19.209

Rosique, M. (2016). G*estión de los residuos y suelos contaminados provenientes de la minería metálica: aspectos técnicos, problemas ambientales y marco normativo.* Cartagena: Repositorio Universidad Politécnica de Cartagena. Obtenido de https://siar.minam.gob.pe/puno/sites/default/files/archivos/public/docs/gestion_de_los_residuos_y_suelos_contaminados_provenientes_de_la_mineria_metalica.pdf

Sanchez, M. (2019). P*ercepción de los impactos ambientales de la minería por los pobladores de la subcuenca del río antabamba, región apurímac, 2018.* Arequipa: Repositorio Intitucional Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa.

Sierra, R. (2006). *Fitorremediacion de un suelo contaminado con plomo por actividad industrial.* Obtenido de http://alertaplomo.org/sites/default/files/fitorremediacion.pdf

Soriano, M. (2018). *Conductividad eléctrica del suelo.* Universitat Politècnica de València.

Villon, J. (2023). *Gestión ambiental y contaminación por relaves mineros en la cuenca del Huascarán-Ancash, 2022 .* Lima: Universidad César Vallejo.

Wong, C. S., Wu, N. S., Duzgoren, Aydin, A., & Aydin y M. H. Wong. (2006). *Trace metal contaminationof sediments in an e-wasteprocessing village in China.* Elsevier Environmental Pollution.

Zavaleta, A. I. (2018). Lupinus mutabilis (Tarwi), Leguminosa andina con gran potencial industrial. En *Lupinus mutabilis (Tarwi), Leguminosa andina con gran potencial industrial* (págs. 6(199), 900-1). Lima: Fondo Editorial de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

WEB GRAFIA

Artedinamico. (14 de 8 de 2023). Equipos y laboratorio de Colombia. Obtenido de Equipos y laboratorio de Colombia: https://www.equiposylaboratorio.com/portal/articulo-ampliado/suelo-alcalino.

Callizaya, R. (14 de 10 de 2015). blogspot. Obtenido de blogspot: istaic.blogspot.com.

CooperAcción. (14 de 11 de 2022). CooperAcción. Obtenido de CooperAcción: https://cooperaccion.org.pe/las-concesiones-mineras-en-el-peru-2/.

Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico. (07 de 09 de 2022). INGEMMET. Obtenido de INGEMMET: https://www.gob.pe/institucion/ingemmet/noticias/647812-apurimac-es-la-tercera-region-con-mayor-produccion-de-cobre-y-molibdeno-a-nivel-nacional.

Intranett. (14 de 07 de 2022). Intranett - Red de Centros Poblados. Obtenido de Intranett - Red de Centros Poblados: https://www.intranett.info/apurimac/antabamba/sabaino/antilla/.

Leyton, D. (5 de 10 de 2020). Tarwi, el cultivo que sana los suelos. Recuperado el 06 de 09 de 2023, de La region: https://www.laregion.bo/tarwi-el-cultivo-que-sana-los-suelos/.

Minero, R. (12 de 02 de 2020). Rumbo Minero. Obtenido de Rumbo Minero: https://www.rumbominero.com/peru/noticias/mineria/peru-entre-los-primeros-lugares-del-ranking-mundial-de-produccion-y-reservas-mineras/.

Moreno, L. (Ed.). (16 de 12 de 2022). Dialogo Chino. Obtenido de Dialogo Chino: https://dialogochino.net/es/actividades-extractivas-es/61618-como-vamos-a-vivir-el-impacto-de-la-mineria-en-las-comunidades-del-sur-de-peru/.

OEFA. (20 de 12 de 2017). Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental. Obtenido de Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental:

Organización de las naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (05 de 01 de 2024). FAO. Obtenido de FAO: https://www.fao.org/fishery/docs/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s04.htm.

Ozuna, C. (24 de 09 de 2007). construccion. Obtenido de (http://www.arqhys.com/construccion/cobre-propiedades.html).

Pérez, R. (02 de 03 de 2020). Carbotecnia. Obtenido de Carbotecnia: https://www.carbotecnia.info/aprendizaje/tratamiento-de-agua/diferencia-entre-absorcion-y-adsorcion/.

Los anexos, panel fotográfico y otros documentos están resguardados en la oficina de repositorio digital institucional en la Biblioteca Central de la Universidad Tecnológica de los Andes