

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL
Y RECURSOS NATURALES



Tesis

Fitorremediación de suelos contaminados por plomo mediante cultivo de la *Urtica dioica* (ortiga) en condiciones de laboratorio, UTEA Filial Cusco en el 2024

Asesor:

Mg. Arrieta Concha, Cynthia Cecilia

Autores:

Huayto Mollo, Israel

Peña Ferro, David

Para optar el Título Profesional de:

Ingeniero Ambiental

Cusco – Cusco – Perú

2025



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TÍTULO PROFESIONAL

En la ciudad de Cusco, a los 24 días del mes de noviembre del año 2025, siendo las 10:00 horas, se reunieron los integrantes del Jurado designado por Resolución Sub Directoral N° 165-2025- UTEA-FI-EPIARN-SD de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental y Recursos Naturales, Facultad de Ingeniería

Presidente :	Econ. Vega Villafuerte Wilfredo Baltazar
Dictaminante :	Mg. Pozo Gonzales José Salustio
Replicante :	Dra. Loayza Chácará Sonia María

Para evaluar la sustentación, en la modalidad de:

Tesis Trabajo de suficiencia profesional

Titulada:

Fitorremediación de suelos contaminados por plomo mediante cultivo de la *Urtica dioica* (ortiga) en condiciones de laboratorio, UTEA Filial Cusco en el 2024

Desarrollado por el (los) Bachiller (es):

Bach: Huayto Mollo, Israel

Bach. Peña Ferro, David

Para optar el Título Profesional de:

Ingeniero (a) Ambiental

Concluido el acto de Sustentación, el Jurado dictaminó que el (la) (los) mencionado(a) (s) bachiller (es) fue (ron) APROBADO (S):

Por: Unanimidad

Emitiéndose el calificativo final de:

Bachiller (Apellidos y Nombres)	Calificación (**)
Bach: Huayto Mollo, Israel	Aprobado
Bach. Peña Ferro, David	Aprobado

Siendo las 12:00 pm horas concluyó el Acto Académico, firmando los integrantes del Jurado.

Presidente: Econ. Vega Villafuerte Wilfredo Baltazar

Dictaminante: Mg. Pozo Gonzales José Salustio

Replicante: Dra. Loayza Chácará Sonia María

(*): **Mayoría:** Dos integrantes del jurado aprueban o desaprueban; **Unanimidad:** Todos los integrantes del jurado aprueban o desaprueban, Art.18 RGGAT.
(**): 0 a 10: Desaprobado, 11 a 15: Aprobado, 16 a 18: Aprobado Notable, 19 y 20: Aprobado con Distinción, Art. 18 RGGAT.




16% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- ▶ Bibliografía
- ▶ Texto citado
- ▶ Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

Fuentes principales

- 13%  Fuentes de Internet
- 4%  Publicaciones
- 14%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

Metadatos

Datos del Autor	
Apellidos y Nombres	: Huayto Mollo, Israel
Tipo de Documento de Identidad	: DNI
Número de Documento de Identidad	: 74398825
URL ORCID	: https://orcid.org/0009-0008-5148-2544
Apellidos y Nombres	: Peña Ferro, David
Tipo de Documento de Identidad	: DNI
Número de Documento de Identidad	: 47462020
URL ORCID	: https://orcid.org/0009-0007-4988-191X
Datos del Asesor	
Nombres y apellidos	: Mgt. Arrieta Concha, Cynthia Cecilia
Tipo de documento de identidad	: DNI
Número de Documento de Identidad	: 42221546
URL ORCID	: http://orcid.org/0009-0009-1843-1064
Datos de la Investigación	
Facultad	: Ingeniería
Escuela Profesional	: Ingeniería Ambiental y Recursos Naturales
Línea de Investigación	: Calidad Ambiental
Rango de años en que se realizó la investigación	: Noviembre-2025 - mayo 2026
Fuente de financiamiento	: Autofinanciado
Porcentaje de similitud	: 16%
URL OCDE	: http://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.07.01

Dedicatoria

Dedico mi trabajo de manera especial a mis familiares que siempre estuvieron ahí, para brindarme el apoyo necesario, y a los docentes que nos brindaron su tiempo y conocimiento para poder avanzar y culminar con el trabajo de tesis, de hacer posible este gran paso para salir adelante como buenos profesionales, y alcanzar nuestras metas y ser un apoyo en este mundo de contantes afecciones al medio ambiente.

Los autores

Agradecimiento

Primero, agradecemos a dios por protegernos y guiarnos en nuestros caminos y en esta etapa universitaria que tuvo muchas dificultades, pero gracias al apoyo de los docentes por brindarnos su conocimiento por la paciencia en estos largos años de aprendizaje y formación universitaria.

Quedamos agradecidos a la Universidad Tecnológica de los Andes por su formación universitaria para darnos los alcances y la facilidad de pertenecer a esta hermosa institución forjadora de grandes profesionales, a los que estuvieron a cargo de nuestra facultad de Ingeniería Ambiental y Recursos Naturales, quienes nos impulsaron a ser competitivos con otros profesionales de diferentes lugares.

A los docentes que se tomaron el tiempo para guiarnos en este proceso de cómo realizar la tesis a sus consejos y guías para poder dar a conocer nuestro trabajo de investigación y así solucionar un problema a un pasivo ambiental.

Los autores

Resumen

El presente estudio tuvo como objetivo evaluar la eficacia de *Urtica dioica* L. (ortiga) en la fitorremediación de suelos altamente contaminados con plomo en el sector Cruz Sayhua, ubicado en la comunidad campesina de Huniñiquiri, distrito de Colquemarca, provincia de Chumbivilcas, Cusco. El ámbito del trabajo comprendió tanto la caracterización inicial del suelo contaminado en campo como la ejecución de ensayos experimentales en laboratorio, orientados a determinar la capacidad de absorción y acumulación de plomo por la especie vegetal seleccionada. Los análisis preliminares reportaron concentraciones de plomo superiores a 19 000 mg/kg, superando ampliamente el límite establecido por el ECA para suelos agrícolas (140 mg/kg). Se aplicó un diseño experimental pre y post tratamiento con enfoque cuantitativo, desarrollado íntegramente bajo condiciones de laboratorio controladas (25 ± 2 °C y 60–70% de humedad). La cuantificación del metal en suelo y tejido vegetal se realizó mediante espectrometría de absorción atómica. Los resultados mostraron que *Urtica dioica* L. redujo la concentración de plomo entre 52.00% y 62.36%, alcanzando acumulaciones de hasta 6 608.12 mg/kg, principalmente en las hojas. Se concluye que esta especie actúa eficazmente como agente fitoextractor y fitoestabilizador, constituyendo una alternativa sostenible, económica y segura para la recuperación de suelos impactados por metales pesados en la zona altoandina.

Palabras clave: fitorremediación, *Urtica dioica*, plomo, suelos contaminados, metales pesados.

Abstract

This study aimed to evaluate the effectiveness of *Urtica dioica* L. (nettle) in the phytoremediation of soils highly contaminated with lead in the Cruz Sayhua sector, located in the Huniñiquiri peasant community, Colquamarca district, Chumbivilcas province, Cusco. The scope of the work included both the initial characterization of the contaminated soil in the field and the execution of experimental tests in the laboratory, aimed at determining the lead absorption and accumulation capacity of the selected plant species. Preliminary analyses reported lead concentrations exceeding 19,000 mg/kg, significantly surpassing the limit established by the Environmental Quality Standard (ECA) for agricultural soils (140 mg/kg). A pre- and post-treatment experimental design with a quantitative approach was applied, developed entirely under controlled laboratory conditions (25 ± 2 °C and 60–70% humidity). The quantification of the metal in soil and plant tissue was performed using atomic absorption spectrometry. The results showed that *Urtica dioica* L. reduced lead concentrations between 52.00% and 62.36%, reaching accumulations of up to 6,608.12 mg/kg, primarily in the leaves. It is concluded that this species acts effectively as a phytoextracting and phytostabilizing agent, constituting a sustainable, economical, and safe alternative for the recovery of soils impacted by heavy metals in the high Andean region.

Keywords: Phytoremediation, *Urtica dioica* L., lead contamination, contaminated soils, environmental remediation, laboratory analysis.

Índice

Portada.....	i
Acta de sustentación.....	ii
Reporte de similitud.....	iii
Metadatos.....	iv
Dedicatoria.....	v
Agradecimiento.....	vi
Resumen.....	vii
Abstract.....	viii
Índice.....	ix
Índice de tablas.....	xi
Índice de figuras.....	xiii
Índice de anexos.....	xiv
I. Introducción.....	15
II. Planteamiento del problema.....	18
2.1. Descripción y formulación del problema.....	18
2.2. Objetivos.....	20
2.2.1. Objetivo general.....	20
2.2.2. Objetivos específicos.....	20
2.3. Justificación e importancia.....	20
2.4. Hipótesis.....	22
2.5 Variables.....	23
III. Marco teórico.....	26
3.1. Antecedentes.....	26
3.2. Bases Teóricas.....	33

3.3. Definición de términos.....	58
IV. Metodología	64
4.1. Tipo y nivel de investigación	64
4.2. Ámbito temporal y espacial	65
4.3. Población y muestra	70
4.4. Instrumentos.....	73
4.5. Procedimientos.....	73
4.6. Análisis de datos	80
4.7. Consideraciones Éticas.....	80
V. Resultados y Discusión.....	83
VI. Conclusiones	102
VII. Recomendaciones.....	104
VIII. Referencias	105
IX. Anexos	110

Índice de tablas

Tabla 1	Operacionalización de variables	24
Tabla 2	Técnicas de Fitorremediación y sus Características	36
Tabla 3	VARIABLES ambientales controladas durante el experimento de fitorremediación en laboratorio.....	79
Tabla 4	Concentración inicial de plomo en muestras de suelo y comparación con los ECA para Suelo	83
Tabla 5	Reducción de Plomo en Suelo – UNSAAC	84
Tabla 6	Reducción de Plomo en Suelo – Laboratorio S-lab.....	85
Tabla 7	Reducción de la concentración de plomo en el suelo.....	85
Tabla 8	Evolución de la concentración de plomo en suelo y plantas en laboratorio.....	86
Tabla 9	Estadísticas de la concentración de plomo en el suelo	87
Tabla 10	Estadísticas de la concentración de plomo en plantas	88
Tabla 11	Relación entre la concentración de plomo en el suelo y la planta completa	89
Tabla 12	Estadísticas de la concentración de plomo en las plantas.....	89
Tabla 13	Estadísticas de la acumulación de plomo en las hojas y total.	91
Tabla 14	Acumulación de Plomo en Diferentes Tejidos de la Planta	92
Tabla 15	Relación entre Concentración de Plomo en el Suelo y la Planta Completa	92
Tabla 16	Acumulación de plomo en diferentes tejidos de Urtica dioica.....	93
Tabla 17	Relación entre concentración de plomo en hojas, tallo y raíz	93
Tabla 17	Diferencias entre la concentración antes y después del tratamiento	94
Tabla 19	Análisis de varianza para el suelo.....	95
Tabla 20	Tukey para suelo.....	96
Tabla 21	Análisis de varianza para planta	97
Tabla 22	Tukey diferencias para planta.....	97

Tabla 23 Estadísticas de la concentración de plomo en el suelo	98
Tabla 24 Certificación y Calibración de Instrumentos	127
Tabla 25 Evaluación de Rendimiento de Instrumentos	127

Índice de figuras

Figura 1 Formas de distribución del plomo en el suelo según su fase y estado físico	38
Figura 2 Imagen satelital del área de influencia minera cercana al sector Cruz Sayhua, distrito de Colquamarca (Cusco)	39
Figura 3 Vías de exposición del plomo en el ambiente y su ingreso al organismo humano	40
Figura 4 Horizontes del suelo: estructura y factores (O, A, E, B, C y R)	50
Figura 5 Planta Urtica dioica L.	57
Figura 6 Ubicación de la toma de muestras.....	67
Figura 7 Ubicación de la realización del trabajo experimental	70
Figura 8 Punto EA-01(0+000-0+1000)	75
Figura 9 Punto EA-01(0+000-0+1000)	75
Figura 10 Punto EA-01(0+000-2+3000)	76
Figura 11 Punto EA-01(0+000-3+4000)	76
Figura 12 Punto EA-01(0+000-4+5000)	77
Figura 13 Punto EA-01(0+000-5+6000)	77
Figura 14 Fase Inicial del Laboratorio	78
Figura 15 Estadísticas de la concentración de plomo en el suelo.....	87
Figura 16 Estadísticas de la concentración de plomo en las plantas	90
Figura 18 Estadísticas de la concentración de plomo en el suelo.....	98

Índice de anexos

Anexo 1 Matriz de Consistencia	111
Anexo 2 Análisis por espectrómetro para determinación de plomo	112
Anexo 3 Instrumento de Recolección de Datos	120
Anexo 4 Información complementaria.....	122
Anexo 5 Panel fotográfico.....	130

I. Introducción

En el contexto internacional, la contaminación por plomo ha aumentado drásticamente desde la revolución industrial, debido a la explotación minera sin control ambiental, lo que generó la acumulación de metales pesados como Pb, Cd, As y Hg en los suelos. En este marco, Quiroga et al. (2020) desarrollaron un estudio en Mosquera, Colombia, enfocado en la fitorremediación como una biotecnología eficaz para tratar suelos agrícolas contaminados con cadmio. El estudio destaca la alta toxicidad del Cd y su presencia persistente en el ambiente como consecuencia de actividades antropogénicas.

A nivel nacional, Camones (2023) evaluó el efecto de tres especies de ortiga (*Urtica urens*, *Urtica dioica* y *Urtica atrovirens*) sobre suelos contaminados con arsénico en Pasco, Perú. Mediante un diseño cuasi experimental, se evidenció que *U. urens* y *U. dioica* favorecieron significativamente la reducción del arsénico, demostrando su capacidad de adaptación en suelos degradados.

De manera similar, en el ámbito local, Yalcoca (2017) investigó la capacidad fitorremediadora de *Urtica urens* sobre suelos contaminados con plomo en Cerro de Pasco, confirmando su efectividad para absorber metales pesados.

Con base en estos antecedentes, el presente estudio se desarrolla en el sector Cruz Sayhua, Colquemarca (Chumbivilcas, Cusco), donde se identificaron concentraciones alarmantes de plomo en el suelo: 19,097.33 mg/kg (UNSAAC) y 19,099.27 mg/kg (S-Lab Perú), niveles que superan ampliamente el Estándar de Calidad Ambiental para suelos agrícolas en Perú (140 mg/kg, DS N.º 011-2017-MINAM). Se seleccionaron seis puntos de

muestreo distribuidos aleatoriamente dentro de un área de 0.6 ha. A partir de estos puntos se obtuvo una muestra compuesta de 100 kg, utilizada para los análisis de laboratorio y las pruebas experimentales posteriores.

Por ello, la presente investigación se desarrolla dentro del campo de la ingeniería ambiental y la restauración ecológica, fomentando el empleo de tecnologías limpias como la fitorremediación. Dado el bajo costo, la fácil propagación y la alta capacidad de acumulación de metales pesados de *Urtica dioica* L., según Díaz et al. (2021), se optó por evaluar la eficacia de esta especie como alternativa fitorremediadora en condiciones de laboratorio.

La investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo y un diseño experimental de pre y post tratamiento. Los esquejes de *Urtica dioica* L. fueron cultivados durante 120 días en macetas con suelo contaminado, manteniendo condiciones controladas de temperatura y humedad. Luego, se evaluó la concentración de plomo en el suelo antes y después del tratamiento. También se analizó la acumulación del metal en raíces, tallos y hojas para determinar la capacidad de fitoextracción y fitoestabilización de la especie.

Ítem I: Introducción. Presenta el contexto de la investigación y la problemática de contaminación por plomo en el sector Cruz Sayhua. Además, se expone la importancia del estudio, los objetivos, la justificación y las hipótesis planteadas.

Ítem II: Planteamiento del problema. Describe y formula el problema de investigación, así como el objetivo general y los objetivos específicos. También desarrolla la justificación teórica, práctica, social y ambiental del estudio.

Ítem III: Marco teórico. Reúne antecedentes internacionales, nacionales y regionales relacionados con la investigación, además de las bases teóricas sobre fitorremediación, propiedades de la ortiga y normativa aplicable.

Ítem IV: Metodología. Explica el tipo y nivel de investigación, la población y muestra, los instrumentos utilizados, los procedimientos realizados y el análisis de datos.

Ítem V: Resultados y discusión. Presenta e interpreta los resultados obtenidos, contrastándolos con las hipótesis y estudios previos.

Ítem VI: Conclusiones. Resume los principales hallazgos del estudio y la efectividad de *Urtica dioica* L. en la reducción de plomo en el suelo.

Ítem VII: Recomendaciones. Incluye propuestas para la aplicación de la fitorremediación y sugerencias para futuras investigaciones.

Ítem VIII: Referencias y los anexos que complementan el desarrollo de la investigación.

II. Planteamiento del problema

2.1. Descripción y formulación del problema

La contaminación por plomo en el suelo es un problema ambiental que afecta a distintos países del mundo, principalmente en zonas cercanas a actividades mineras e industriales. La presencia de este metal puede alterar la calidad del suelo y representar un riesgo para la salud de las personas y el ambiente. Por ello, organismos como la FAO y la OMS han mostrado preocupación por sus efectos negativos. Frente a esta situación, se han propuesto alternativas más sostenibles para recuperar suelos contaminados. Una de ellas es la fitorremediación, técnica basada en el uso de plantas para absorber contaminantes. En ese sentido, *Urtica dioica* L. ha sido considerada una especie con capacidad para absorber metales pesados, además de presentar usos medicinales y nutricionales (FAO, 2019).

En el Perú, la contaminación por plomo es un problema frecuente en zonas mineras como La Oroya y Cerro de Pasco, donde las actividades mineras han provocado la acumulación de este metal en el suelo. Investigaciones como las de Abanto et al. (2016) y Rodríguez et al. (2019) (2019) mencionan que los metales pesados deterioran el suelo, afectan los ecosistemas y pueden perjudicar la salud de las personas. A pesar de ello, el uso de técnicas como la fitorremediación aún es poco aplicado en muchas zonas afectadas.

A nivel local, el sector Cruz Sayhua, en el distrito de Colquemarca, provincia de Chumbivilcas (Cusco), ha sido identificado como una zona críticamente afectada por contaminación de plomo en el suelo. Esta debido a la acumulación de residuos de antiguas actividades mineras y con el uso continuo de fertilizantes y pesticidas que contienen metales.

Análisis de laboratorio realizados por la UNSAAC y S-Lab reportaron concentraciones de plomo de 19,097.33 mg/kg y 19,099.27 mg/kg, superando en más de 136 veces los límites establecidos por los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para suelos agrícolas (140 mg/kg) y en más de 23 veces el límite industrial (800 mg/kg), según el D.S. N.º 011-2017-MINAM (Estándares de Calidad Ambiental de Suelo). Esta situación puede perjudicar la salud de las personas y afectar el aprovechamiento agrícola del suelo.

Si los niveles de plomo en el sector Cruz Sayhua continúan aumentando, los efectos sobre el ambiente y la población podrían agravarse. La acumulación de este metal en el suelo puede contaminar los cultivos y afectar la calidad del agua. Además, representa un riesgo para la salud, principalmente en niños y adultos mayores. Del mismo modo, la productividad agrícola podría seguir disminuyendo, perjudicando la economía de las familias que dependen de estas tierras. También podrían presentarse problemas como la pérdida de biodiversidad y el deterioro progresivo del suelo.

Frente a esta problemática, es necesario buscar alternativas sostenibles y accesibles para recuperar la calidad del suelo. En ese contexto, la fitorremediación con *Urtica dioica* L. puede ser una opción viable, debido a su capacidad para absorber plomo del suelo. Además, esta técnica no requiere maquinaria pesada ni productos químicos, por lo que puede aplicarse con mayor facilidad en comunidades rurales. Su uso ayudaría a reducir gradualmente la contaminación del suelo, favoreciendo la recuperación agrícola y disminuyendo los riesgos para la salud y el ambiente.

2.1.1. Problema general

¿Cuál es el efecto del cultivo de *Urtica dioica* L. (ortiga) en la recuperación de los suelos contaminados por plomo en el sector Cruz Sayhua, en condiciones de laboratorio durante el año 2024?

2.1.2. Problemas específicos

- ¿Cuál es el nivel de concentración de plomo en el suelo antes del tratamiento con *Urtica dioica* L. durante el año 2024?
- ¿Cuál es el nivel de concentración de plomo en el suelo después del tratamiento con *Urtica dioica* L. durante el año 2024?
- ¿Cuál es el nivel de absorción y acumulación de plomo en *Urtica dioica* L. (ortiga) cuando se cultiva en suelos contaminados durante el año 2024?

2.2. Objetivos

2.2.1. Objetivo general

Evaluar los efectos del cultivo de la *Urtica dioica* L. (ortiga) en la recuperación de suelos contaminados por plomo en el sector Cruz Sayhua, en condiciones de laboratorio durante el año 2024

2.2.2. Objetivos específicos

- **OE1:** Determinar el nivel de concentración de plomo en los suelos del sector Cruz Sayhua antes del tratamiento con *Urtica dioica* L. durante el año 2024.
- **OE2:** Evaluar el nivel de concentración de plomo en los suelos del sector Cruz Sayhua después del tratamiento con *Urtica dioica* L. durante el año 2024.
- **OE3:** Determinar el nivel de absorción y acumulación de plomo en la *Urtica dioica* L. cuando se cultiva en los suelos contaminados del sector Cruz Sayhua.

2.3. Justificación e importancia

La presente investigación surge debido a la problemática ambiental identificada en el sector Cruz Sayhua, donde los análisis realizados por los laboratorios UNSAAC y S-Lab evidenciaron concentraciones de plomo en el suelo muy por encima del límite permitido para uso agrícola. Frente a ello, se propone el uso de *Urtica dioica* L. como alternativa de

fitorremediación, ya que es una planta de fácil acceso y bajo costo. Con esta propuesta se busca una solución práctica y accesible para la recuperación de suelos contaminados en zonas rurales.

Desde el aspecto **social**, esta investigación es importante porque busca contribuir a la protección de la salud de las comunidades locales que dependen de la agricultura y la ganadería. La reducción de plomo en el suelo ayudaría a disminuir el riesgo de que este metal ingrese a los alimentos y afecte la salud de la población, principalmente de niños y adultos mayores.

En el aspecto **práctico**, la investigación demuestra que una planta silvestre puede ser utilizada como alternativa de remediación, logrando una reducción promedio de 56.48 % de plomo en suelos contaminados. Esta solución puede ser aplicada en otras comunidades afectadas por pasivos ambientales, promoviendo la restauración ecológica con bajo impacto económico y logístico.

El **valor teórico** de esta investigación radica en que aporta conocimiento sobre el comportamiento Fito extractor de *Urtica dioica L.* en condiciones específicas de laboratorio, ampliando el marco de estudios sobre fitorremediación en el contexto andino peruano. Además, los hallazgos refuerzan teorías sobre la capacidad adaptativa de ciertas especies vegetales en suelos contaminados con metales pesados.

Finalmente, en su **utilidad metodológica**, el estudio emplea un diseño experimental riguroso, con control de variables ambientales como temperatura, humedad y composición del suelo, y con herramientas analíticas como la espectrometría de absorción atómica. Esta metodología puede ser replicada o adaptada en futuras investigaciones relacionadas con remediación de suelos contaminados, fortaleciendo las prácticas experimentales dentro del campo de la ingeniería ambiental y la biotecnología vegetal.

La presente investigación aporta significativamente al campo de la ingeniería ambiental al evaluar la eficiencia de la fitorremediación mediante el uso de *Urtica dioica L* para la extracción y acumulación de plomo (Pb) en suelos contaminados. Este estudio proporciona evidencia científica sobre la capacidad bioacumuladora de esta especie, lo cual permite generar información técnica útil para la gestión de áreas impactadas por actividades mineras y para la formulación de estrategias de recuperación de suelos degradados. Asimismo, los resultados de la investigación podrán ser utilizados como referencia en planes de monitoreo ambiental, proyectos de remediación y políticas públicas de gestión de suelos contaminados, contribuyendo a mejorar la toma de decisiones en contextos de impactos ambientales derivados de la minería. De esta forma, la investigación fortalece el desarrollo de herramientas de ingeniería ambiental sostenible, integrando técnicas basadas en procesos naturales para minimizar los efectos de la contaminación por metales pesados.

2.4. Hipótesis

2.4.1. Hipótesis General

El cultivo de *Urtica dioica L.* (ortiga) favorece la recuperación de suelos contaminados por plomo, reduciendo su concentración y promoviendo procesos de fitoextracción en condiciones ambientales del laboratorio durante el año 2024.

2.4.2. Hipótesis Especificas

HE1. No aplica. El objetivo específico 1 corresponde a una caracterización inicial del suelo..

HE2. La concentración de plomo en los suelos del sector Cruz Sayhua disminuye después del tratamiento con *Urtica dioica L.* durante el año 2024.

HE3. La *Urtica dioica* L. absorbe y acumula plomo en sus tejidos (raíces, tallos y hojas) cuando es cultivada en los suelos contaminados del sector Cruz Sayhua durante el año 2024.

2.5 Variables

Variable independiente:

Fitorremediación mediante el cultivo de *Urtica dioica* L.

Variable dependiente:

Recuperación de suelos contaminados por plomo

Tabla 1

Operacionalización de variables

Variables	Definición conceptual	Operacionalización	Dimensiones	Indicador	Técnica e Instrumentos
Variable independiente Fitorremediación mediante el cultivo de <i>Urtica dioica</i> L.	Es el grado de concentración de plomo (Pb) que disminuye en el suelo a través de mecanismos de absorción, acumulación o estabilización de <i>Urtica dioica</i> L. (Pulford. 2003) La Ortiga Mayor, o <i>Urtica dioica</i> L., es una planta silvestre que crece generalmente en zonas húmedas, no necesita de un cuidado especial ya que es una planta común que crece en todo el mundo. (2001, diciembre 19 Consumer.)	Durante el estudio, se monitorizará el crecimiento y salud de la ortiga y se analizarán periódicamente muestras del suelo y de la planta. Al final, se compararán los niveles de plomo antes y después del cultivo para evaluar la efectividad de la ortiga en la reducción de la contaminación.	Nivel de adaptabilidad Tipo de crecimiento	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Altura de la planta</i> • Tasa de supervivencia (%) • Velocidad de crecimiento (cm/mes) Número de hojas <i>Altura de la Urtica dioica</i> L.	Tipo de Investigación Cuantitativa Alcance de la investigación Explicativo Diseño de Investigación Experimental Población Suelos del sector Cruz Sayhua Muestra Puntos representativos en los suelos Técnica: <ul style="list-style-type: none"> • Análisis estadístico Instrumentos: <ul style="list-style-type: none"> • Ficha de observación
Variable Dependiente Recuperación de suelos	Cuando se habla de tratamiento y recuperación de suelos, se está haciendo referencia al conjunto de actividades que	proceso de revitalización y restauración de tierras afectadas por altas concentraciones de	Concentración de plomo	<ul style="list-style-type: none"> • miligramos de plomo por kilogramo de suelo seco (mg/kg) 	

contaminados por plomo	tienen por finalidad controlar, mitigar o eliminar la contaminación existente (Innova Ambiental, 2020)	plomo. Esto implica identificar áreas dañadas, aplicar técnicas específicas, monitorear el suelo para asegurar una disminución efectiva de los niveles de este contaminante, buscando que la tierra vuelva a ser segura y fértil para el cultivo y otras actividades.	Biodisponibilidad	<ul style="list-style-type: none">• Fracción de plomo (mg/kg) Miligramo de plomo por kilogramo de <i>Urtica dioica L.</i> (seca/viva)	<ul style="list-style-type: none">• Experimentación
------------------------	--	---	-------------------	---	---

III. Marco teórico

3.1. Antecedentes

Quiroga et al. (2020) analizaron la fitorremediación como una alternativa para tratar suelos agrícolas contaminados con cadmio en Mosquera, Colombia. La investigación señala que este metal representa un riesgo para el ambiente y la seguridad alimentaria debido a su alta toxicidad y a las actividades humanas que favorecen su presencia en el suelo. Tras evaluar 12 especies vegetales, se identificó a *Urtica dioica* L., *Taraxacum officinale* y *Sinapis alba* L. como las más eficientes para absorber cadmio. Además, se menciona que el uso de aguas del río Bogotá para riego ha contribuido a la contaminación de los cultivos con metales pesados. Los resultados respaldan la fitorremediación como una alternativa sostenible y de bajo costo para recuperar suelos contaminados.

En la tesis de Zúñiga (2020), se estudió la fitorremediación de suelos agrícolas contaminados con cadmio en el río Guayas, Ecuador. La investigación tuvo como objetivo evaluar una alternativa para reducir la presencia de este metal en el suelo contaminado. Para ello, se utilizaron plantas acuáticas de *Eichhornia crassipes*, las cuales fueron colocadas en los suelos contaminados. Además, se trabajó con diferentes concentraciones de cadmio, entre ellas 2, 4 y 8 mg/kg. Estas plantas fueron expuestas al cadmio durante 62 días. Los resultados mostraron que la *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms tuvo la capacidad de eliminar el cadmio de los suelos contaminados, con tasas de remoción de cadmio del 11.75% y 23.63% en la acumulación de 4 mg/kg y 8 mg/kg, respectivamente. Los resultados demostraron que esta especie puede ser efectiva en la fitorremediación de suelos

contaminados con cadmio, debido a su capacidad de adaptarse a distintas concentraciones de este metal en el suelo.

Neugschwadtner et al. (2019) en su estudio sobre la fitorremediación de Pb y Cd en un suelo agrícola contaminado mediante diferentes regímenes de aplicación de EDTA: Medidas de eficiencia a escala de laboratorio y campo, tuvo como objeto principal: (i) examinar los diferentes procesos para manejar, es decir, las aplicaciones simples de EDTA versus la aplicación de EDTA en condiciones de los cultivos y de los laboratorios, para efectos de restaurar las superficies agrícolas contaminadas con este metal pesado y con el Cd provenientes de las zonas de fundiciones, de Příbram en República Checa, y examinar el posible riesgo vinculado a aplicar el EDTA en términos de constituir un elemento contaminante del agua subterránea en cultivos. Los cultivos utilizados en el estudio fue el maíz (*Zea mays*). Se encontró que la aplicación de EDTA aumentó el transporte de cada metal pesado en las soluciones la superficie. La aplicación fraccionada de EDTA resultaron en niveles bajos de ambos metales solubles en agua, en laboratorios como en los campos experimentales. Esto sugiere que el riesgo de contaminación del agua subterránea podría disminuir mediante la aplicación controlada de EDTA. En contraste, las aplicaciones simples de EDTA provocaron una mayor movilización de Cd y Pb, lo que generó estrés en las plantas, fitotoxicidad y una disminución en la producción de biomasa en comparación con la composición que fue objeto de fraccionamiento. Sin embargo, la cantidad simple favoreció a que se diera las absorciones de Pb y Cd y mejoraron la vigencia de la fitorremediación en comparación con la cantidad fraccionada. El resultado obtenido en términos de biomasa seca de las plantas y la impregnación del metal pesado en los experimentos con macetas se pudieron verificar en cierta medida la experimentación en espacios abiertos. En el campo, la impregnación de ambos metales pesados, y la obtención de biomasa disminuyeron con posterioridad de la adición de EDTA. Además, las eficiencias

de remediación en los campos fueron con reducida significancia que, en los laboratorios, en parte por las mayores cantidades de superficies por plantas en una condición de espacios externos, lo que se destaca la limitación trasladar los resultados de la estancia hacia espacios abiertos. Las cantidades bajas de eficiencia de remediaciones en los espacios externos y la movilización significativa de ambos metales pesados hacia las capas más recónditas del suelo plantean preocupaciones sobre la idoneidad del uso de EDTA y Z. mays para remediar superficies que tiene una contaminación con un metal pesados en plazos razonables y plantean riesgos contaminantes de las aguas subterráneas.

Camones (2023) realizó un estudio para evaluar la fitorremediación utilizando tres variedades de ortiga: *Urtica urens*, *Urtica dioica* y *Urtica atrovirens*, en la calidad de suelos contaminados con arsénico en el depósito de relaves de Quiulacocha, en el distrito de Simón Bolívar, provincia y región de Pasco. Empleando un enfoque cuasi experimental y un paradigma cuantitativo, se distribuyeron 18 kg de suelo contaminado en maceteros asignados a cada tipo de ortiga. Los resultados mostraron una reducción importante del arsénico después del tratamiento. En particular, *Urtica urens* y *Urtica dioica* presentaron una buena capacidad de adaptación y contribuyeron a la recuperación de los suelos contaminados. En general, el estudio concluye que la fitorremediación con estas especies de ortiga es efectiva para mejorar suelos afectados por actividades mineras.

Guadamos y Julca (2022) realizaron una revisión sobre la eficiencia de la fitorremediación en suelos afectados por la minería aurífera, analizando el uso de *Brassica juncea*, *Cecropia peltata* y *Urtica urens* entre los años 2010 y 2021. El estudio se basó en la revisión de artículos científicos disponibles en repositorios en español, con el objetivo de evaluar la capacidad de estas especies para remover metales pesados del suelo. Como resultado, se elaboró un diagrama que resume las etapas del proceso de fitorremediación,

destacando su efectividad en la adsorción de metales y su potencial como alternativa ambientalmente sostenible para la recuperación de suelos afectados por la minería.

Ortiz & Rojas (2022) realizaron un estudio comparativo sobre la eficacia de *Urtica urens*, *Aloe barbadensis miller* y *Helianthus annuus* en la fitorremediación de suelos contaminados con plomo y cadmio. El trabajo se basó en una revisión documental de diferentes investigaciones, seleccionadas mediante criterios de inclusión y exclusión, cuyos resultados fueron organizados en tablas comparativas. Encontraron que el *Helianthus annuus* presentó mayor eficiencia en la remoción de plomo (70.88%), mientras que *Urtica urens* mostró mejores resultados en la eliminación de cadmio (74%). Asimismo, se identificaron distintos mecanismos de acción según la especie, como fitoextracción, fitovolatilización y fitoestabilización. Finalmente, al comparar los niveles de metales obtenidos con los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) del Perú, se observó que en varios casos aún se superaban los límites permitidos.

Quincho y Saldaña (2023) realizaron un estudio cuantitativo para evaluar la eficiencia de *Urtica urens* L. en la fitoextracción de plomo en suelos contaminados. Los resultados mostraron una reducción importante de las concentraciones de plomo en el suelo, pasando de 2846 mg/kg a 1889.50 mg/kg en los niveles más altos, y de 683.26 mg/kg a 272.36 mg/kg en los más bajos. Asimismo, evidenciaron que la concentración inicial de plomo influye en la mayor absorción del contaminante por la planta, y que la adición de agregados al suelo también puede mejorar la eficiencia del proceso. Resaltando que la, *Urtica urens* L. resultó efectiva para la fitoextracción de plomo en suelos contaminados.

Sedano & Zanabria (2022) evaluaron la capacidad fitorremediadora de *Urtica urens* y *Amaranthus hybridus* para la remoción de mercurio en suelos contaminados del pasivo ambiental minero de Santa Bárbara, en Huancavelica. El estudio fue de tipo experimental aplicado, con un diseño a escala piloto, en el que se trabajó con 45 puntos de muestreo en

un área de 81.38 ha. Se aplicaron ambos tratamientos vegetales en suelos con distintos niveles de contaminación, además de un grupo control sin plantas. Los resultados mostraron una eficiencia del 50.54% para *Urtica urens* y del 25.75% para *Amaranthus hybridus*. También se monitorearon parámetros fisicoquímicos como pH, temperatura y conductividad eléctrica durante el proceso. Sin embargo, se indicó que *Urtica urens* no alcanzó el nivel de eficiencia considerado óptimo para validar plenamente el tratamiento.

Paredes (2021) evaluó el uso de *Urtica urens* L. y *Urtica dioica* L. en la fitorremediación de un botadero a cielo abierto en Marabamba. El estudio fue experimental y consideró dos grupos con cuatro repeticiones, analizando parámetros físicos, químicos y biológicos del suelo, incluyendo plomo, cadmio y zinc, en comparación con los ECA para suelo. Los resultados mostraron reducciones de plomo y cadmio en ambas especies: *Urtica urens* L. redujo 80.5 ppm de Pb y 1.64 ppm de Cd, mientras que *Urtica dioica* L. logró reducir 92.5 ppm de Pb y 1.575 ppm de Cd. También se observaron mejoras en el pH y en la materia orgánica del suelo, destacando una mayor eficacia de *Urtica dioica* L.

Castro (2020) evaluó el efecto del quelato EDTA en la fitorremediación de un suelo contaminado con plomo utilizando *Urtica urens* en La Oroya. El estudio aplicó cinco dosis de EDTA en un diseño completamente al azar con tres repeticiones, trabajando con 18 macetas bajo condiciones controladas durante 60 días. Los resultados mostraron que la planta acumuló mayor cantidad de plomo en las raíces (259.287 mg Pb/kg) que en la parte aérea (151.617 mg Pb/kg), lo que evidencia su potencial como especie fitoestabilizadora. Asimismo, se observó un comportamiento variable del factor de translocación y del factor de bioacumulación, indicando una baja movilidad del plomo hacia la parte aérea. En conclusión, *Urtica urens* fue efectiva para la fitoestabilización del plomo al retenerlo principalmente en las raíces.

En la tesis de Díaz (2017), se evaluó la capacidad de *Urtica urens* L. para la fitorremediación de suelos contaminados con Pb en La Oroya, Junín. El estudio tuvo como objeto a ser estudiado establecer si la ortiga podía acumular plomo del suelo contaminado. La investigación fue ejecutada en 2 meses y se utilizó la pericia ex situ con diseños experimentales que incluyeron cinco formas de repetirlos. Se realizaron exámenes con anterioridad y posterioridad de los tratamientos en estudio. El resultado mostro que esta planta pudo acumular 84.34 mg/kg de plomo en sus pétalos y 25.06 mg/kg en cada raíz. La acumulación originaria del de Pb en la superficie eran de 1119.51 mg/kg, y después del tratamiento, disminuyó a 1010.05 mg/kg, lo que representó una reducción de 109.046 mg/kg de Pb. El estudio concluyó que la ortiga presenta capacidad para acumular plomo, logrando una reducción significativa de su concentración en el suelo, tanto en las raíces como en la parte aérea de la planta.

En la tesis de Silva (2017), se evaluó la capacidad de *Urtica urens* L. para la fitorremediación de suelos contaminados con metales pesados en el sector Campanario, Quiruvilca (La Libertad). El objeto a ser estudio fue establecer si la planta objeto de análisis podía ayudar a reducir la existencia de un metal pesado en la superficie. Se utilizó la técnica ex situ en una maceta para cultivar esta planta, y se fueron diseñando experimentos cuasi experimentales con grupos experimentales y con grupos de controles. Se hicieron uso de una muestra de superficie y se analizó la concentración de metales pesados utilizando el método EPA Method 200.7, Rev.4.4. Posteriormente de los 98 días de cultivo de la planta, se observó una significativa remoción de Cr en 81.56% y una disminución de Sb en 80.83%. Además, se encontró una disminución en Cu en 49.68%, As en 37.58%, y en 24.93%. Sin embargo, la ortiga no fue capaz de la fitorremediación de AL, Br, Be, Cs, Li ni Vanadio, y en algunos casos aumentó sus concentraciones. En resumen, se concluye que la planta estudiada está caracterizada por su efectividad para la fitorremediación de ciertos metales

pesados como el Cr y el Antimonio, pero no tiene la capacidad de remediar otros como el Al, Ba, Ber, Cs, Li y Vanadio, y en algunos casos aumenta sus concentraciones en el suelo.

La tesis de Díaz (2018), titulada "Evaluación de la calidad de suelo en un bosque reforestado con eucalipto en la zona de Pacán - Huánuco," tuvo como objeto de estudio analizar la calidad de la superficie de bosques recolectados una planta del eucalipto. Se realizó la selección de las plantas de eucalipto (*Eucalyptus globulus*) de las cuales se extirparon 15 tipo de muestras de la superficie de la zona reforestada con eucalipto y 15 de la superficie que todavía no está reforestada, siguiendo diseños de adopción de muestra específica. El resultado que se obtuvo de los laboratorios luego de haber examinado la superficie indicó que los bosques reforestados (representados por las muestras de 1, M1), el pH era de 7.12, los contenidos de materias orgánicas (M.O.) del 5.63%, el nitrógeno (N) era de 0.25%, el fósforo (P) era de 3.3 ppm, y el potasio (K) era de 62 ppm. Además, de los exámenes mecánicos de la superficie se pudo demostrar que tenía una textura clasificada como Franco Arenoso. En contraste con ello, la superficie caracterizada por la ausencia de coberturas vegetales (representados por las muestras de 2, M2) tenía un pH de 8.24, M.O. del 1.77%, Nitrógeno (N) de 0.07, Fósforo de 2.2 ppm, y K de 156 ppm. Los exámenes mecánicos de la superficie reflejaron que tenía una textura clasificada como Franco Arcilloso. Señala que el estudio sugiere que las reforestaciones de la ladera de este cerro sean con eucalipto podría mejorar la calidad del suelo al hacerlo más neutro en pH, aumentar los contenidos de materias orgánicas (M.O.), y, como consecuencia, incrementar el nivel de nitrógeno en la superficie.

Yacolca (2017) en su estudio titulado "Capacidad fitorremediadora de la ortiga (*Urtica urens*) en suelo contaminado con Pb por pasivos ambientales ubicado en San Miguel-Cerro de Pasco 2017" señala que el objeto de esta investigación, evaluar la capacidad de esta planta para remediar la superficie contaminada con Pb debido a la

contaminación ambiental en San Miguel. Se hicieron uso de los estudios experimentales ex situ en el que se utilizaron cuatro semilleros de ortiga con 20 días de germinación, la cual se trasplanto a un macetero de 5 kg de capacidad. El sustrato se compuso de un 80% de la superficie contaminada en la parte baja y un 20% de sustrato orgánico (humus de lombriz) en la parte superior sin combinar. El procedimiento tuvo una duración de 4 meses. El examen originario reveló que la superficie tenía una concentración de plomo de 424.84 mg/kg, pero con posterioridad al procedimiento, esta concentración disminuyó a 324.55 mg/kg. Se observó una correspondencia directamente proporcional entre la biomasa de las plantas y las concentraciones de Pb en el suelo. De la misma forma, se notaron cambios significativos en la característica morfológica de las cuatro plantaciones. Asimismo, se logró una la disminución de hasta 243.63 mg/kg de plomo en una repetición y se mejoró el parámetro fisicoquímico de la superficie sometida a procedimientos. En resumen, la investigación demostró que la planta estudiada es capaz de disminuir la aglutinación del Pb en la superficie contaminada, lo que podría contribuir a la reparación del área afectada por la contaminación de plomo.

3.2. Bases Teóricas

3.2.1. Fitorremediación

El MINAM] (2017) señala que se tratan de tecnologías basadas en la utilización de una planta y microorganismos asociados para la reducción de las concentraciones de un contaminante orgánico e inorgánicos en las superficies, de una entidad de agua y aire. Esta técnica aprovecha cada proceso bioquímico naturales de una planta para remediar daños ambientales y se ha desarrollado a lo largo de los años, siendo una herramienta sostenible y efectiva para abordar la contaminación.

Para Jiménez (2017) la fitorremediación se centra en plantas acumuladoras de metales pesados y utiliza técnicas como la fitoextracción, fitoestabilización y fitofiltración

para eliminar o reducir la presencia de contaminantes. A diferencia de métodos tradicionales, la fitorremediación hace uso de la radiación del sol como una de las fuentes de energía principal, lo que la hace más eficiente y sostenible en términos de costos e impactos ambientales mínimos.

Es importante destacar que la contaminación causada por la actividad humana, como a la actividad agrícola, la minería, las industrias y eventos como derrames de hidrocarburos, podrían traer consigo una consecuencia acumulativa para la salubridad de las personas y el ecosistema a lo largo del tiempo. La fitorremediación ofrece una alternativa viable para tratar áreas contaminadas, lo que evita el abandono de sitios contaminados a cambio de una solución costosa y contribuye a la preservación del medio ambiente.

3.2.1.1. Estrategias de Fitorremediación

Andrady et al. (2022) señala que las estrategias de fitorremediación aprovechan las capacidades de una planta para aglutinar un metal pesado en su tejido vegetal, ya sea en raíces, tallos o hojas. A continuación, se resumen las principales estrategias de la misma:

- **Fito degradación:** Es un proceso de biorremediación en el que las plantas y los microorganismos que están asociados a sus raíces (rizosferas) degradan contaminantes orgánicos, las plantas absorben contaminantes orgánicos a través de sus raíces mediante sus enzimas (como oxidasas, peroxidasas) lo transforman en moléculas menos dañinas, los microorganismos (bacterias y hongos) asociados a las raíces contribuyen a la descomposición de los contaminantes.
- **Fitoestimulación:** En este proceso la Fitoestimulación o rizodegradación cumple con un proceso de biorremediación en el que las plantas favorecen la actividad de los microorganismos en la rizosfera (zona alrededor de las raíces) para degradar contaminantes orgánicos del suelo o el agua cual sea el caso. Las raíces comienzan

a liberar azúcares, ácidos orgánicos y enzimas que estimulan el crecimiento de bacterias y hongos degradadores (Kumar et al.,2019).

- **Fitoestabilización:** Es una técnica de fitorremediación que busca la inmovilización de los contaminantes encontrados en el suelos (principalmente metales pesados y metaloides) mediante el uso de las plantas, evitando su dispersión por erosión, lixiviación o infiltración cualquiera sea el caso, a diferencia de la fitoextracción , no remueve los contaminantes presentes , sino que las retienen y reduce su biodisponibilidad, algunas plantas acumulan metales en sus raíces, evitando su translocación a partes aéreas, las raíces modifican el PH y liberan exudados que fijan los metales en forma menos solubles (sulfuros y fosfatos). (Wang et al., 2020)
- **Fitovolatilización:** Es un proceso por el cual la fitorremediación en el que las plantas absorben contaminantes del suelo o agua, los transportan a sus tejidos a la atmosfera en forma de compuestos volátiles mucho menos tóxicos o inertes que no representan ningún tipo de amenaza, las raíces absorben los contaminantes (metales volátiles o compuesto orgánicos en su interior) los contaminantes viajan a hojas y tallos, los cuales se transforman en gases a través de los estomas. Liu et al. (2020).
- **Fitoextracción:** En esta estrategia, se utilizan plantas para extraer metales que se encuentran en el lugar u otros contaminantes del suelo expuestos por la mano del hombre, son excelentes bioacumuladores también de aguas contaminadas, esencialmente de la fitorremediación, que emplea las para descontaminar ambientes, estas especies vegetales tienen una gran capacidad de absorber y almacenar metales pesados en sus tejidos, una vez que las plantas han acumulado los contaminantes se cosechan y procesan para su incineración (Huaranga et al., 2021).
- **Rizofiltración:** Es una técnica de fitorremediación que utiliza sistemas radiculares de las plantas acuáticas o semiacuáticas para absorber, precipitar o filtrar

contaminantes (metales pesados, radionúclidos y compuestos orgánicos) y desde aguas contaminadas, los contaminantes se adhieren a la superficie de las raíces o se acumulan en tejidos vegetales, las raíces también actúan como una barrera viva, reteniendo los sedimentos y partículas contaminadas. (Jiménez, 2017).

Tabla 2

Técnicas de Fitorremediación y sus Características

Técnica	Definición	Contaminantes	Mecanismo principal
Fitodegradación	Degradación de contaminantes orgánicos por enzimas vegetales y microorganismos.	Pesticidas, hidrocarburos (benceno, TNT), solventes (TCE).	Metabolismo en tejidos vegetales o rizosfera.
Fitoestimulación	Plantas estimulan microbios de la rizosfera para degradar contaminantes. Inmovilizan los metales	Petróleo, pesticidas, BETEX (benceno tolueno).	Exudados radiculares promueven actividad microbiana.
Fitoestabilización	contaminantes en el suelo. Inmoviliza contaminantes en suelo, evitando su dispersión.	Metales pesados (Pb, Cd, As) y metaloides.	Absorción en raíces o precipitación en suelo.
Fitovolitización	Plantas absorben y liberan contaminantes como gases a la atmósfera.	Mercurio (Hg), selenio (Se), compuestos volátiles (TCE).	Transporte a hojas y volatilización por estomas.
Fitoextracción	Extracción y acumulación de contaminantes en tejidos aéreos.	Metales pesados (Cd, Zn, Ni) y metaloides (As).	Hiperacumulación en hojas/tallos.
Rizofiltración	Filtración de contaminantes en agua	Metales (Pb, Cu, U), radionúclidos	Absorción o adsorción en raíces.

Nota. (Flores et al., 2013).

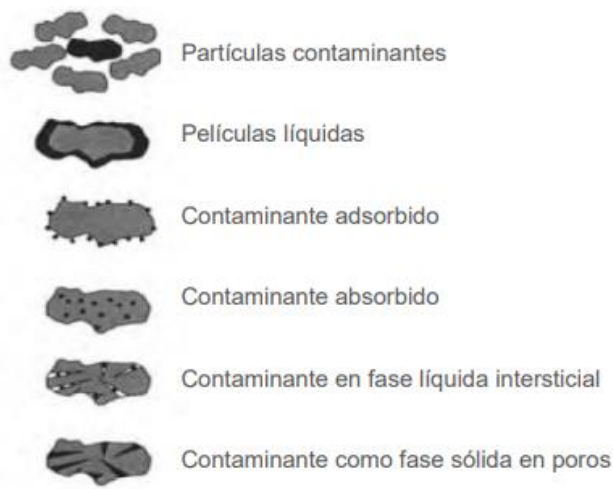
3.2.1.2. Propiedades del plomo

Los metales se encuentran en forma natural, la movilización implica la forma química o física de un elemento, esto se da por sus efectos biológicos que pueden cambiar, de acuerdo al uso antrópico que predeterminen, los sedimentos del plomo se pueden hallar en seis formas diferentes como partículas (contaminantes particulados), como películas líquidas, absorbidos disueltos en el agua intersticial de los poros o como fósiles sólidos de los poros (Rodríguez et al., 2019).

Los compuestos orgánicos pueden sufrir una conversión o degradación después de ser liberados en el medio ambiente, si el compuesto permanece un buen periodo de tiempo sin cambios, claramente la consecuencia si, si tiene propiedades tóxicas es más grave que si son degradables en compuestos menos nocivos. Los seres humanos están expuestos al plomo a través de la inhalación de polvo u otras partículas y la ingestión de agua y alimentos contaminados, la atmósfera es el principal modo de transporte y el aire urbano tiene concentraciones más altas de plomo que el aire en sitios rurales, la contaminación local tales como industria o viejos sistemas de plomería, con respecto a la ingestión dietética de plomo, la ingesta oral a través de los alimentos es cuantitativamente más importante que la ingesta a través del agua a la exposición medioambiental (Russell, 2019).

Figura 1

Formas de distribución del plomo en el suelo según su fase y estado físico



Nota. (Rusell, 2019).

Fuentes de contaminación por plomo:

Fuentes puntuales son aquellos que en los contaminantes llegan al medio receptor desde el punto de descarga o arrastre en temporada de lluvias las cuales generan un gran avance del plomo desmedido, en definición la zona minera esta unos 13500 mts del centro de cruz Sayhua el cual tiene como un impacto ambiental significativo por la volatilidad del plomo que se trabajó en el lugar (Camones, 2023).

Fuentes difusas son aquella que en los contaminantes llegan a los medios receptores desde las zonas amplias y extendidas, geográficamente disgregadas, difícilmente identificables como pueden ser el ciclo del agua el cual en la ascendencia o vaporización al cumulonimbus las partículas de plomo son sujetas por las partículas de agua disueltas en el aire las cuales formaran parte de la precipitación en épocas de lluvia y la infiltración y arrastre (Camones, 2023).

Figura 2

Imagen satelital del área de influencia minera cercana al sector Cruz Sayhua, distrito de Colquemarka (Cusco)

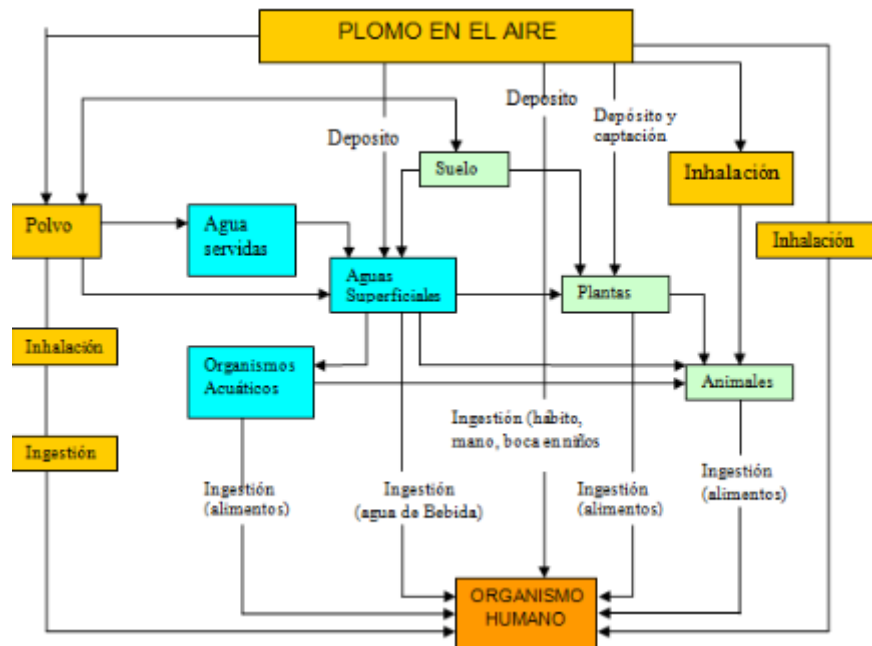


Nota. Recuperado de Google Earht

La minería informal se anexa con la carretera central de challa cual es la carretera que es usada por los pobladores, y transportistas la cual fue usada libremente el cual no tenía medidas de control para su transporte de minerales, estos podrían ser perjudiciales para los próximos años en la salud de la población de Cruz Sayhua, estas estepas de trabajo tomaron en control la volatilidad del plomo ni la infiltración en época de lluvias, la cual la escorrentía fluvial hizo el arrastre del plomo transportando el plomo a diferentes puntos de las zonas cercanas (Camones, 2023).

Figura 3

Vías de exposición del plomo en el ambiente y su ingreso al organismo humano



Nota. (Romoleroux et al., 2019).

3.2.1.2.1. Ventaja y desventaja de la fitorremediación

Conforme refieren Agudelo et al. (2020) el proceso que implica fitorremediar le saca provecho de las capacidades naturales de las plantaciones para efectos de su absorción y eliminación de contaminantes de la superficie, lo que la convierte en una opción rentable y amigable con el medio ambiente para abordar problemas de contaminación del suelo. Esta perspectiva resalta la importancia de buscar soluciones sostenibles que sean efectivas económicamente y que también minimicen el impacto al medio ambiente. Según Romoleroux et al. (2019):

Ventajas:

- Se tratan de tecnologías sostenibles que hacen uso de la capacidad natural de una planta y de un sistema en el que está basado para la remediación de la superficie

contaminada, lo que la hace más económica en comparación con métodos tradicionales.

- Permite que un metal pueda ser absorbido por parte de una planta, que con posterioridad podrá ser extraído de los tejidos vegetales cosechados, lo que facilita el reciclaje de contaminantes.
- Es eficaz para limpiar y remedia gran cantidad de elementos que generan la contaminación debido a las capacidades de una planta para la absorción de un metal en su raíz.
- Tienen capacidades preventivas de evitar que algún contaminante ingrese al ambiente, reduciendo su salida a sistemas hidrológicos subterráneos.
- Reduce la utilización innecesaria y no causa un impacto negativo en la naturaleza en cuanto a los espacios contaminados.
- Se tratan de técnicas ecológicas sostenibles que pueden ser de aplicación en diferentes ambientes que están caracterizados por su contaminación moderada.
- Tiene bajos costos de implementación y no requiere trabajadores altamente especializados.
- No son perjudiciales para el medio ambiente y generan un impacto de menos magnitud en el sitio de remediación
- No generan un contaminante secundario, por ello no se necesitan instalaciones para su eliminación.
- Son más probables de que sean aceptados por una comunidad local debido a su atractivo estético.
- Evita la necesidad de realizar excavaciones y reduce la perturbación del suelo.
- Es efectiva en el tratamiento de diversos compuestos peligrosos y contribuye al reciclaje de recursos como biomasa y metales.

- Utiliza la radiación del sol como una de las fuentes energéticas principales y se basa en procesos naturales y biológicos.
- Las plantas tienen la capacidad de tolerar una amplia gama de concentraciones de contaminantes orgánicos.
- Actúan en vinculación con la revegetación y la biodegradación.

Desventajas:

- Pueden tratarse de procesos lentos, especialmente cuando se utilizan especies vegetales de vida prolongada, como árboles y arbustos.
- Su eficacia depende de que los contaminantes estén dentro del alcance de la raíz de una planta, limitándose a profundidad es de 3 a 6 pies para plantas herbáceas y 10 a 15 pies para árboles.
- En algunos casos, cierta especie vegetal tiene la capacidad de absorción de un metal venenoso, lo que podría afectar la cadena alimentaria.
- Comparada con otras tecnologías similares, la fitorremediación puede requerir más tiempo para lograr resultados.
- Las plantas necesitan tiempo y de una estación para desarrollarse completamente.
- Las proporciones de un tóxico en un medio ambiente limitan el crecimiento de la vegetación.
- En algún caso, los contaminantes acumulados en las partes superiores de una planta (hoja) pueden volver a la atmósfera durante la caída de las hojas en otoño.
- Cada contaminante acumulado en la madera de las plantas puede ser redimido durante la combustión.
- No todas las especies vegetales son capaces de soportar o de acumular un contaminante.

- En contaminante soluble pueden aumentar y causar daños ambientales o ser transportados a otras áreas.
- Requiere espacios proporcionadamente grandes para llevar a cabo la fitorremediación.
- Cierta especie vegetal pueden estimular la proliferación de un tipo de mosquito, especialmente en un sistema hídrico.
- La eficacia de la remediación está limitada por el tamaño de las raíces de las plantas.
- La rizosfera requiere condiciones específicas, como oxígeno, tipo de suelo, agua y actividad microbiana, para que la fitorremediación se desarrolle.
- El suelo puede estar expuesto a la erosión hídrica y eólica en las etapas tempranas de la fitorremediación.
- Los resultados de la fitorremediación pueden requerir un largo período de tiempo debido a la naturaleza gradual del proceso.

3.2.2. El suelo

Russell (2019), señala que el suelo es un recurso natural fundamental que desempeña un papel crucial en la existencia en la superficie. Otorga soportes físicos para la planta, almacenando agua y cada nutriente necesario, actúan como hábitat para una variedad de organismos y desempeña un papel en la purificación del agua y el ciclo de nutrientes. Sin embargo, el suelo también es vulnerable a la contaminación, que podría poseer una grave consecuencia para el entorno y la salubridad del ser humano. Aquí se exploran algunos aspectos clave de la relación entre el suelo y la contaminación. Según Russell (2019) las fuentes de contaminación del suelo son:

- Contaminantes químicos: Incluye un producto químico, industriales, pesticidas, herbicidas, metal pesado, producto farmacéutico y un producto químico

doméstico que se infiltran en el suelo a través de vertidos accidentales o liberaciones intencionales.

- Contaminación orgánica: La aglutinación de materias orgánicas en descomposición, como desechos de alimentos y estiércol, podrían conducir a la contaminación del suelo, generando olores desagradables y liberando compuestos químicos indeseables.
- Efectos de la contaminación del suelo:
- Degradación de la calidad de la superficie: Los contaminantes tiene la capacidad de la modificación de las composición química y biológica de la superficie, esta situación afecta a la fertilidad y a las capacidades para el sostenimiento de vidas vegetales.
- Impacto en la biodiversidad: La contaminación del suelo puede dañar los organismos del suelo, como bacterias, hongos y lombrices, lo que a su vez afecta la salud del ecosistema y la biodiversidad.
- Peligro para la salud: El contaminante a la superficie puede dar lugar a la acumulación de contaminantes en cultivos y alimentos, lo que represento riesgos para la salubridad de los seres humanos si se consumen productos contaminados.
- Métodos de remediación del suelo:
- Fitorremediación: Utiliza plantas para absorber y acumular contaminantes del suelo, luego las plantas se cosechan y se eliminan de manera segura.
- Biodegradación: Microorganismos descomponen contaminantes orgánicos en el suelo en componentes menos tóxicos.
- Excavación y relleno: Se retira el suelo contaminado y se reemplaza con tierra limpia.

- Tratamientos químicos: Se aplican productos químicos para neutralizar o eliminar contaminantes.
- Prevención de la contaminación del suelo:
- Gestiones adecuadas de residuos: Evitar vertidos ilegales y disponer de residuos de manera segura y controlada.
- Uso responsable de productos químicos: Reducir el uso de pesticidas y productos químicos tóxicos y seguir prácticas agrícolas sostenibles.
- Educación y conciencia pública: Promover la conciencia ambiental y la responsabilidad individual en la prevención de contaminantes de la superficie.

3.2.2.1. Calidad del Suelo.

Según lo describe Espejo (2016), está estrechamente relacionada con su capacidad para proporcionar diversas funciones ecosistémicas. Esta función es de dependencia de los contenidos de las materias orgánicas, principalmente carbono orgánico, presente en el suelo. En un equilibrio natural de los ecosistemas, se mantiene una constante proporción de carbono orgánico en el suelo. Durante el desarrollo de la vegetación, se obtienen nutrientes y agua de la superficie, y se utiliza CO₂ de la atmósfera en los procesos de la fotosíntesis.

Esto contribuirá a la formación de biomasa que, con la injerencia microbiana, se convierte en humus. En estos ciclos biogeoquímicos, el humus se mineraliza en disímiles cantidades, generalmente oscilando entre el 0,5% y el 5%, estribando de la actividad microbiana en el entorno. Asimismo, se liberan una emisión de CO₂ atmosférico, lo que significa que los nutrientes del suelo se vuelven a utilizar por la vegetación. Cuando los ambientes mantienen una armonía, la descomposición de los restos orgánicos en la superficie del suelo genera una cantidad proporcional de humus que se mineraliza debido a la acción microbiana (Rusell, 2019).

3.2.2.2. Propiedades físicas, químicas y biológicas del Suelo

Sedano & Zanabria (2022), señalan que Las propiedades del suelo pueden clasificarse en tres categorías principales: propiedades físicas, químicas y biológicas. A continuación, se presenta una estructura más detallada de estas propiedades en forma de prosa, junto con algunas fórmulas relacionadas:

Propiedades Físicas del Suelo:

- **Texturas:** Están referidas a las proporciones relativas de una partícula de arena, limo y arcilla en la superficie. Las texturas influyen en las capacidades del para su retención y en el suelo para la radio de acción. Una de las fórmulas para la determinación de texturas de la superficie fueron las fracciones de cada tipo de partícula en la superficie (Supo & Zacarías, 2020).
- **Densidad:** Están referidas a las cantidades de masa de las con unidades de volúmenes. Se calcula como la masa dividida por el volumen del suelo (Supo & Zacarías, 2020).
- **Porosidad:** Está referida a los espacios vacíos entre una partícula de la superficie y es fundamental para la locomoción del aire y la conservación de agua. Se calcula como el cuerpo de poros dividido por el volumen total del suelo (Supo & Zacarías, 2020).
- **Permeabilidad:** Están referidas a las capacidades de la superficie para posibilitar el flujo de agua la superficie. Se relaciona con la porosidad y la textura del suelo (Supo & Zacarías, 2020).

Propiedades Químicas del Suelo:

- **pH del Suelo:** El pH del suelo revela su acidez o alcalinidad y puede afectar la disponibilidad de cada nutriente para la planta. Se miden en escalas de 0 a 14,

donde 7 es neutro, un valor por debajo de 7 es ácido y un valor por sobre 7 son alcalinos (Supo & Zacarías, 2020).

- **Contenido de Materia Orgánica:** Son las materias orgánicas en la superficie, que influye en la fertilidad y estructuras de la superficie. Se calcula como la cantidad de materia orgánica por unidad de volumen del suelo. (Supo & Zacarías, 2020).
- **Cationes Intercambiables:** Los cationes como calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}), potasio (K^+) y otros son importantes para el suministro de nutrientes a las plantas. Se mide en meq/100 g de suelo (Supo & Zacarías, 2020).

Propiedades Biológicas del Suelo:

- **Biodiversidad Microbiana:** La biodiversidad de microorganismos en el suelo, como bacterias, hongos y actinomicetos, influye en la desintegración de materias orgánicas y la reserva de un nutriente (Supo & Zacarías, 2020).
- **Actividad Microbiana:** La actividad microbiana se refiere a la tasa de procesos biológicos que ocurren en el suelo, como la desintegración de materias orgánicas. Se puede medir mediante la liberación de dióxido de carbono (CO_2) (Supo & Zacarías, 2020).
- **Ciclo de Nutrientes:** El ciclo de nutrientes en el suelo implica la transformación de nutrientes como el N, P y el K por organismos de la superficie y su reserva para la planta (Supo & Zacarías, 2020).

Cada propiedad física, química y biológica del suelo se interrelacionan para determinar la calidad y las capacidades de la superficie para mantener la vida vegetal y mantener la salud del ecosistema (Tarazona, 2018).

La ortiga es una planta silvestre con un alto valor botánico y medicinal. Sus hojas son ricas en minerales como silicatos, hierro, potasio, magnesio y calcio, así como en

vitaminas A y C. Esto la convierte en una planta valiosa tanto para la salud como para la alimentación (Yacolca, 2017).

Horizontes del suelo:

Los horizontes del suelo son capas distintas que forma de forma natural a lo largo del tiempo en la superficie terrestre estas capas están compuestas por diferentes y presentan características específicas que distinguen unas a otras, puede revelar pista sobre historia geológica y las condiciones ambientales del área en que se encuentra (Ecología Verde, 2020).

La formación de horizontes de suelo está influenciada por una variedad de factores complejos e interrelacionados, factores incluyen procesos biológicos, como la descomposición de la materia orgánica por microorganismos y la actividad de raíces de las plantas, así como factores climáticos como precipitación y la temperatura, los procesos físicos, la erosión y la sedimentación estos desempeña un papel importante en la información del suelo (Ecología Verde, 2020).

Factores trabajan junto para dar forma a las capas del suelo generando características únicas en cada horizonte .Algunos horizontes pueden tener altos niveles de materia orgánica en descomposición ,lo que hace ricos en nutrientes y aptos para la agricultura .Otros horizontes pueden estar dominados por minerales y ser menos fértiles ,diferentes horizontes del suelo puede afectar la capacidad de retención de agua , la aireación, la estructura del suelo y la disponibilidad de nutrientes para las plantas (Ecología Verde, 2020).

- **Horizonte O:** Se compone principalmente de materiales vegetales en descomposición, como hojas y por lo tanto se clasifica como horizonte superficial. Su relevancia es mayor en zonas boscosas ya que allí se puede acumular un mayor volumen de materia vegetal (Ecología Verde, 2020).

- **Horizonte A:** Es la capa superior del suelo y es donde establece firmemente las raíces de los pastos, a veces esta capa esta oscurecida por una capa de horizonte O. La bioturbación puede ocurrir en esta sección del suelo está compuesta por combinación de partículas de arcilla y arena y generalmente es delgada, tiene un tono oscuro debido a la presencia de humus o materia orgánica (Ecología Verde, 2020).
- **Horizonte E:** Se caracteriza por falta de materia orgánica y un color claro debido al proceso de elevación, lixiviación o lavado vertical, a medida que se adentra más en el suelo se genera una capa de materia orgánica, hierro, aluminio o arcilla, la estructura a menudo esta subdesarrollada y a veces está completamente ausente (Ecología Verde, 2020).
- **Horizonte B:** Carece de humus ,lo que resulta en una coloración más clara de tonos de marrón o rojo .Esto se debe a la ausencia de materia orgánica ,los sedimentos y materiales de los horizontes superiores (O,A,E)se transforman y depositan en este horizonte estos materiales pueden incluir arcilla, óxidos e hidróxidos metálicos, sales ,carbonatos y varias otras sustancias .Es rico en óxido de hierro que se acumula a través de transporte de materiales más solubles desde el horizonte superior por el agua (Ecología Verde, 2020).
- **Horizonte C:** Es una capa que marca la transición al lecho rocoso a medida que uno profundiza en el suelo, esta capa se vuelve menos alterada hasta que es indistinguible de la roca madre. El horizonte C está compuesto por fragmentos de meteorización mecánica incluidos guijarros gruesos, arena y arcilla. Es el destinatario de las soluciones que transporta el agua desde las capas superiores (Ecología Verde, 2020).

- **Horizonte R:** Se trata de la roca madre subyacente que permanece intacta y sin fragmentar y sirve como base para el resto del perfil. puede que no sea necesario el lecho rocoso del suelo y solo podría representar parcialmente un paleo sol (Ecología Verde, 2020).

Figura 4

Horizontes del suelo: estructura y factores (O, A, E, B, C y R)



Nota. (Ecología Verde, 2020).

Existen diversos métodos de muestreo de suelos, cuya elección depende de los objetivos del estudio, el tipo de contaminante a evaluar, la variabilidad del terreno y los recursos disponibles. A continuación, se describen los principales métodos de muestreo utilizados en estudios ambientales, con énfasis en el método de muestreo compuesto, que fue aplicado en el presente estudio (MINAM, 2014).

3.2.2.3 Métodos de Muestreo de Suelo: tipos, ventajas y desventajas.

La selección del tipo de muestreo es fundamental para garantizar la representatividad y confiabilidad de los datos obtenidos en estudios de contaminación del suelo. A continuación, se describen los principales tipos:

- a) **Muestreo aleatorio simple:** consiste en seleccionar puntos de muestreo al azar dentro del área de estudio. Su principal ventaja es su sencillez y facilidad de ejecución, ya que no requiere información previa del sitio. Sin embargo, una desventaja significativa es que podría no captar adecuadamente la variabilidad espacial del contaminante, lo que puede afectar la representatividad del análisis (MINAM, 2014; Supo & Zacarías, 2020).

Ventajas:

- Minimiza el sesgo del investigador.
- Es fácil de implementar si el área es accesible y homogénea.

Desventajas:

- Puede no representar adecuadamente zonas con variabilidad ambiental.
- Requiere una buena delimitación previa del área.

- b) **Muestreo sistemático:** se basa en ubicar puntos de muestreo siguiendo un patrón regular, como una cuadrícula o a distancias fijas. Su ventaja radica en que permite una cobertura uniforme del área, facilitando la interpretación espacial. No obstante, si existe una distribución periódica del contaminante que coincide con el patrón, puede introducir sesgos en los resultados (MINAM, 2014; Díaz, 2018).

Ventajas:

- Proporciona buena cobertura espacial.
- Es fácil de replicar y documentar.

Desventajas:

- Puede coincidir con patrones de variabilidad natural y producir sesgos si hay ciclos o repeticiones en el terreno.

c) **Muestreo estratificado:** implica dividir el terreno en zonas homogéneas (estratos) según características similares como uso del suelo o topografía, y tomar muestras dentro de cada estrato. Este método mejora la representatividad y reduce la variabilidad de los datos. Como desventaja, exige un mayor conocimiento previo del área y planificación más compleja (López & Contreras, 2017; Supo & Zacarías, 2020).

Ventajas:

- Aumenta la precisión en áreas heterogéneas.
- Permite comparar subzonas específicas.

Desventajas:

- Requiere información previa para definir los estratos.
- Más complejo en diseño y ejecución.

d) **Muestreo dirigido (o intencionado):** se seleccionan los puntos de muestreo de manera deliberada, con base en criterios específicos del investigador, por ejemplo, en zonas donde se presume mayor contaminación. Su ventaja es que permite identificar zonas críticas con alta precisión, aunque su principal desventaja es que no permite generalizar los resultados a toda el área porque no es estadísticamente representativo (Camones, 2023; MINAM, 2014).

Ventajas:

- Útil para estudios exploratorios o en zonas críticas.
- Puede identificar focos de contaminación específicos.

Desventajas:

- Alto riesgo de sesgo.
- No permite generalizar resultados al área total.

e) **Muestreo compuesto:** consiste en mezclar varias muestras simples de una misma zona homogénea para formar una muestra única representativa. Su principal ventaja es que reduce los costos y el tiempo de análisis, siendo útil para obtener una visión general del área. Sin embargo, su desventaja es que al integrar varias muestras se pierde la capacidad de identificar focos puntuales de contaminación (Carhuaricra, 2019; MINAM, 2014).

Ventajas:

- Aumenta la precisión en áreas heterogéneas.
- Permite comparar sub zonas específicas.

Desventajas:

- Requiere información previa para definir los estratos.
- Más complejo en diseño y ejecución.

3.2.3. La *Urtica dioica* L. (Ortiga)

Zerbino & Altier (2020) Indican que en Europa del norte y este, se conoce la tradicional sopa de ortigas, y las hojas frescas se están redescubriendo como un sustituto de las espinacas en ensaladas y platos diversos. Cuando se manipulan mecánicamente, las hojas pierden su capacidad de picar debido al jugo de ortiga y los pelos urticantes. Se pueden amasar, moler, secar o hervir para hacerlas inofensivas. Las semillas de ortiga también son valiosas, ya que se puede extraer un aceite aromático de ellas que se utiliza en la cocina y en la medicina. Tanto las hojas como las raíces de la ortiga se utilizan en medicina y cosmética, principalmente por su efecto diurético y para aliviar dolencias reumáticas. La infusión de ortiga es un remedio común en la medicina popular, y el shampoo de ortiga es conocido por sus beneficios (Yacolca, 2017).

En el jardín, las ortigas se utilizan para fortalecer otras plantas en caso de infestación por plagas y como abono orgánico líquido de fácil elaboración. También son un indicador de la presencia de nitrógeno en el suelo y son una partida significativa de alimentos para las orugas de mariposa, como la mariposa pavo real y el pequeño zorro, en su fase de oruga. En la actualidad, la ortiga está experimentando un renacimiento como planta de fibra, ya que se cultiva profesionalmente por sus fibras de alta calidad. Con su variedad de usos y beneficios, la imagen negativa de esta planta debería desaparecer (Yacolca, 2017). Entre sus características de la Ortiga (*Urtica dioica L.*):

- Familia de plantas: Urticaceae
- País de origen: Europa y Norteamérica también presente en el Perú para uso medicinales
- Altura de las plantas: 80-120 cm
- Florescencia: Agosto, Julio, octubre, septiembre
- Color de las flores: Verde
- Sistema radicular: Rizoma
- Ciclo vital: Perenne y Vivaz
- Zona de resistencia al frío: 4 (-34 °C a -30 °C)
- Clima: Moderado
- Exposición al sol: Sombra parcial y pleno sol
- Tipo de suelo: Alimenticio, Fresco, Mojado, Rico en humus

3.2.4. Nombre científico y clasificación taxonómica e información agronómica *Urtica dioica L.* (Ortiga)

Según la evaluación del herbario Vargas Cuz – UNSAAC, dicha clasificación taxonómica la realizó el Blgo. Harold Quio P; designado por la Dra. María Luisa Ochoa

Camara. La *Urtica dioica L.*, comúnmente conocida como ortiga, pertenece al reino Plantae y tiene la siguiente clasificación taxonómica:

- Reino: Plantae
- División: Magnoliophyta (Angiospermas)
- Clase: Magnoliopsida
- Orden: Rosales
- Familia: Urticaceae
- Género: *Urtica*
- Especie: *Urtica dioica L.*
- Tiempo de crecimiento: Mayo a julio y fructifica de julio a septiembre.

Se trata de una de las plantas perennes que se encuentra en diversas regiones del mundo. Tiene hojas opuestas con pelos urticantes que pueden causar irritación en la piel al ser tocados. Además de su uso tradicional en la medicina popular para tratar diversas dolencias, la ortiga también ha sido utilizada en la agricultura y jardinería (Zúñiga, 2020).

En términos agronómicos, la ortiga puede tener propiedades beneficiosas para el suelo debido a su capacidad para acumular nutrientes. Algunas personas utilizan infusiones de ortiga como fertilizante orgánico para enriquecer el suelo. Además, la planta puede ser cultivada con fines medicinales o como parte de proyectos de agricultura sostenible. Sin embargo, debido a sus pelos urticantes, se debe tener cuidado al manipularla (Tarazona, 2018). De este modo se puede señalar que *Urtica dioica L.* presenta lo siguiente:

Taxonomía de *Urtica dioica L.*: Se tratan de taxones circumpolares, presentes de forma natural en el norte de Eurasia y el norte de América. En el país mexicano, una de las sub especies, son clasificadas como *Urtica dioica L.* variedad *angustifolia*, considerada por algunos autores como sinónimo de *Urtica dioica L. ssp. Gracilis* (Sedano & Zanabria, 2022).

Categoría taxonómica:

- Reino: Plantae; Subreino: *Traqueobionta*; *Superdivisión: Spermatophyta*; División: *Magnoliophyta*; Clase: *Magnoliopsida*; Subclase: *Hamamelidae*; Orden: Urticales.
- Caracterización y diseño
- Descripciones técnicas basadas en Rzedowski y Rzedowski (2001):
- Hábitos y formas de vida: Hierbas, casualmente con la base algo leñosa.
- Capacidad: Varía de 60 cm a 2 m de altura.
- Tallos: Erectos, cuadrados, con una estípula de 5 a 15 mm de longitud.
- Hoja: Lanceolada a ovada, de 5 a 15 cm de largo, ápice atenuado, bordes aserrados, bases cuneadas a redondeadas; pecíolo de 1 a 3 cm de longitud.
- Inflorescencia: Axilar en formas de espiga ramificada, agrupada por diferentes generalmente más largas que el pecíolo.
- Flor: Dioica, pequeña y verde; la masculina con un perianto de 4 segmentos y 4 estambres, la femenina con periantos de 4 partes.
- Fruto y semilla: Aquenio ovoide de 1 a 2 mm de largo, ordinariamente dispersados entre los periantos, comprimidos, de color café, café oscuro o amarillento.
- Plántula: Hipocótilo alargado de 5 a 8 mm; cotiledon de lámina ovadas, ápices retusos, bordes enteros; epicótilos cilíndricos de hasta 2 mm; hoja opuesta, peciolada, de láminas aovadas a estrechamente elípticas, de 2 a 4 mm de largo y 1 a 2 mm de ancho, borde crenado, con pelos (Espinosa y Sarukhán, 1997). Distribución altitudinal:
- Ciclo de vida: Plantas perennes.
- Fenologías: Florecen de mayo a julio y fructifica de julio a septiembre.
- Enlace a sitio con indagación sobre biología y ecología: Investigación sobre la característica de la semilla en ePic del Jardín Botánico Real de Kew.

- Incidencia y relevancia: Cultivo afectado y efecto sobre el cultivo:
- Usos: Son comestibles (su hoja joven es comestible) y tiene usos medicinales (contra la artritis).

Figura 5

Planta Urtica dioica L.



Nota. Quincho & Saldaña (2023)

3.2.5. Normativas relevantes para la investigación en fitorremediación

- **Decreto Supremo N° 011-2017-MINAM (Actualización de los ECA Suelo):** Este decreto actualiza los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para suelo, que son las normas que definen los límites máximos permisibles de contaminantes en el suelo, incluyendo el plomo. La referencia a este decreto es crucial en el informe de tesis para alinear los resultados de la investigación con los estándares nacionales, asegurando que la evaluación de la eficacia de la fitorremediación se realice en un contexto normativo actualizado (MINAM, 2017).

- **Decreto Supremo N° 012-2017-MINAM - Criterios para la Gestión de Sitios Contaminados:** Este decreto establece las directrices para la identificación, evaluación, intervención y monitoreo de sitios contaminados. Incluir una referencia a este marco normativo es esencial para la tesis, ya que proporciona los criterios bajo los cuales se deben gestionar los estudios de contaminación del suelo y las estrategias de remediación, incluyendo la fitorremediación. Este decreto también especifica los procedimientos para la evaluación de riesgos y la rehabilitación de sitios, lo que es fundamental para planificar y justificar las metodologías empleadas en la investigación (MINAM, 2017).

3.3. Definición de términos

Biorremediación: La biorremediación se refiere al uso de un organismo y microorganismo presente en la superficie y el subsuelo para limpiar y restaurar suelos que han sido impactados negativamente. Se utilizan los propios organismos del suelo como aliados en este proceso (s/f. Edu.lat. 14 de octubre de 2025)

Botaderos: Los botaderos son lugares donde se disponen residuos sólidos sin tratamiento previo, lo que puede tener una incidencia negativa en la salubridad del ser humano y su entorno (s/f. Edu.pe. 14 de octubre de 2025)

Ex Situ: Ex situ es una técnica de análisis de suelos contaminados que implica la excavación o remoción de la superficie antes de los procedimientos. La muestra se estudia fuera de su lugar de comienzo (Guadamos & Julca, 2022).

ECA: Es el valor límite que establece la concentración máxima permitida de un contaminante en el ambiente (aire, agua o suelo) para proteger la salud humana y el ecosistema.

ECA Suelos Decreto Supremo N° 011-2017-MINAM: La medida que establece el nivel de concentración o grado de elementos ,sustancias o parámetros físicos , químicos y biológicos, presentes en el agua ,aire y suelo , en su condición de cuerpo receptor ,que no presenta riesgos significativos para su salud de las personas ni al ambiente .Es obligatorio en el diseño de las normas legales y las políticas públicas ,así como referente obligatorio en el diseño de ampliación de todos los instrumentos de gestión ambiental.

De superarse los ECA para el suelo, en aquellos parámetros asociados a las actividades productivas, extractivas y de servicios de personas naturales y jurídicas a cargo de estas deben realizar acciones de remediación de sitios contaminados, con la finalidad de proteger la salud de las personas y el ambiente. Lo indicado no aplica cuando la superación de las ECA para el suelo sea inferior a los niveles de fondo, los cuales proporcionan informaciones acerca de concentraciones de origen natural de las sustancias químicas presentes en el suelo, que puedan incluir el aporte de fuentes antrópicas no relacionadas al sitio en evaluación (MINAM, 2017).

Criterios Para La Gestión De Sitios Contaminados Decreto Supremo N° 012-2017-MINAM (Actualización de los ECA Suelo): Esta presente normativa tiene por objetivo establecer criterios para la gestión de sitios contaminados generados por actividades antrópicas, los cuales comprenden aspectos de evaluación y remediación, a ser regulados por las autoridades sectoriales competentes, con la finalidad de proteger la salud de las personas y el ambiente. Los planes de remediación constituyen un tipo de instrumento de gestión ambiental, referido a los planes de descontaminación y el tratamiento de pasivos ambientales ,señala que estos están dirigidos a remediar los impactos ambientales originados por uno o varios proyecto de inversión o actividades pesados ,precisa que los citados planes deben considerar el financiamiento y las responsabilidades que correspondan a los titulares de las actividades contaminantes , incluyendo la compensación de daños generados ,bajo

principio de responsabilidad ambiental. Por otro lado, las entidades de competencias ambientales promuevan y establecen planes de descontaminación y recuperación de ambientes degradados y Autoridad Ambiental Nacional establece los criterios para su elaboración (MINAM, 2017).

Fitorremediación: La fitorremediación es la capacidad natural de la planta y el fitoplancton para eliminar un contaminante en el ambiente, contribuyendo a la restauración de áreas degradadas por actividades humanas. Ayuda a mantener la armonía ecológica (López & Contreras, 2017).

Lixiviación: Son procesos en las cuales son líquidos, generalmente el agua, atraviesa residuos sólidos y transporta sustancias disueltas en él. Puede ocurrir en rellenos sanitarios y botaderos a cielo abierto y está relacionada con la precipitación y otros factores climáticos (Paredes, 2021).

Tipos de lixiviación

Lixiviación minera (hidrometalurgia): Este proceso se usa para extraer metales valiosos (Au, Cu, Pb, U) de minerales mediante solución química.

Lixiviación en agricultura: En este proceso se da cuando el agua de lluvia o riego arrastra nutrientes (nitratos, potasio) o contaminantes como pesticidas comúnmente usados hacia capas, más profundas del suelo, contaminando acuíferos.

Lixiviación de residuos (vertederos): este proceso se da cuando el agua percola a través de los residuos sólidos, generando el arrastre de sustancias tóxicas (lixiviados) que pueden contaminar suelo y aguas.

Muestreo: El muestreo es la actividad de tomar muestras representativas del suelo para su posterior estudio en el laboratorio, lo que permite caracterizar el suelo para un estudio específico (MINAM, 2017).

Ortiga: La ortiga es una planta del género *Urtica* que posee hojas cubiertas de pelos urticantes que causan irritación en la piel al tocarlas. También tiene flores unisexuales de color verde (Romoleroux et al., 2019).

La *Urtica dioica* L posee múltiples usos medicinales, agrícolas y ecológicas, su hábitat de preferencia son zonas húmedas y frescas, bordes de caminos y terrenos ricos en mitógenos, sus mecanismos de defensa son liberar histamina, acetilcolina y ácido fórmico.

Por esta razón la ortiga es usado como purín fermentado que es un bioestimulante y repelente natural para los cultivos, fertilizantes ya que son ricos en nitrógeno y micronutrientes, repelentes de plagas, ya que aleja a pulgones y ácaros, fortalecimientos de plantas ayuda efectivamente a resistencia enfermedades a cultivos de consumo.

Parámetro: Un parámetro en el suelo es una sustancia o elemento químico que se utiliza para definir su calidad y podría tener regulación de una norma que reglamento estándar de calidad medioambiental (MINAM, 2017).

Plan de Descontaminación de la superficie: Se trata de instrumentos para la gestión del medio ambiente que posee como objeto el remedio del impacto ambiental ocasionado por la actividad de la superficie. Puede incluir acciones para recuperar eficientemente el suelo (MINAM, 2017).

Diagnóstico y evaluación:

Identificación del contaminante: son análisis químico que se da mediante la espectrometría para metales, cromatografía para orgánicos, mapeo de la zona georeferenciación específica (MINAM, 2017).

Evaluación de riesgos: niveles de toxicidad y movilidad del contaminante presente, impacto en la salud humana y el ecosistema que lo rodea (MINAM, 2017).

Caracterización del sitio: aquí encontraremos los tipos de suelo que poseen, arcilloso, arenoso franco arcilloso, etc. Profundidad de la contaminación que ha presentado, presencia de aguas subterráneas afectadas por los contaminantes existentes en dicha zona por actividades de extracción de materia prima (MINAM, 2017).

Remediación: La remediación se refiere a las acciones o estrategias realizadas áreas contaminadas para la eliminación de reducción de un contaminante con el objeto de otorgar una protección a la salubridad del ser humano y a su mentor (MINAM, 2017).

Tipos de remediación ambiental

Remediación de suelos: son técnicas empleada para limpiar suelos contaminados por metales pesados, hidrocarburos pesticidas, etc. Esto se mediante métodos físico-químicos como la excavación y disposición, es la remoción y traslado a vertederos controlado, así también lavado de suelos, en donde el uso de solventes se da para extraer contaminantes, solidificación y estabilización, es la inmovilización de contaminantes con cemento o cal (MINAM, 2017).

Métodos biológicos, en este proceso encontramos a la fitorremediación, el cual se da por uso de plantas (Urtica, girasoles, alfalfa, etc.), En el siguiente proceso encontramos bioestimulación, aporte de nutrientes para activar microorganismos degradadores, biopilas, son pilas tratado con bacterias que degradan hidrocarburos (MINAM, 2017).

Resiliencia: Esta referida a su capacidad para resistir y recuperarse de las alteraciones causadas por actividades humanas y presiones externas. Implica la capacidad del suelo para restaurarse después de sufrir cambios (Ortiz & Rojas, 2022).

Tipos de resiliencia:

Resiliencia ecológica: es la capacidad de un ecosistema para mantener o recuperar sus funciones tras una perturbación esencialmente después de incendios forestales antrópicos y/o causas naturales (Ortiz & Rojas, 2022).

Resiliencia climática: es la adaptación de comunidades frente a sequías, inundaciones o aumento de temperatura que afecta el crecimiento y fructificación de las plantas, para esto se crean agriculturas con cultivo resistente a las sequías (Ortiz & Rojas, 2022).

Resiliencia social: es la habilidad de una comunidad para reorganizarse ante las crisis que se presentan de forma antrópica o natural, reconstrucción post-terremoto inundaciones de huaycos con participación ciudadana (Ortiz & Rojas, 2022).

Resiliencia individual: es la capacidad psicológica para superar adversidades frente a acontecimientos no deseados que generan malestar, personas que adoptan prácticas sostenibles frente a diferentes tipos de desastres (Ortiz & Rojas, 2022).

Sitio Contaminado: Se tratan de superficies o cuyos elementos característicos a nivel físico, químico y microbiológicos fue alterado de manera negativa debido a la existencia de una sustancia tóxica proveniente de una actividad humana, la misma que podría constituir una representación de los riesgos para la salubridad y la atmósfera (MINAM, 2017).

IV. Metodología

4.1. Tipo y nivel de Investigación

La presente investigación es de tipo aplicada, debido a que buscó ofrecer una solución práctica a un problema ambiental concreto: la presencia de concentraciones elevadas de plomo (Pb) en suelos del sector Cruz Sayhua. Según Hernández & Fernández (2014), la investigación aplicada se orienta a “resolver problemas específicos mediante la generación de conocimientos con utilidad inmediata”. En este estudio, la aplicación del proceso de fitorremediación mediante *Urtica dioica L.* constituye directamente una estrategia orientada a mitigar la contaminación del suelo.

El nivel de investigación es explicativo, ya que se identificó y analizó la relación causa-efecto entre la presencia de plomo en el suelo y su reducción a través de la bioacumulación en la planta de ortiga. Sampieri et al. (2014) indican que la investigación explicativa busca “determinar las razones de los fenómenos, estableciendo relaciones de causalidad”. En este caso, se busca explicar cómo y en qué magnitud *Urtica dioica L.* reduce la concentración de plomo en el suelo.

El diseño metodológico corresponde a un diseño experimental de tipo preexperimental, específicamente del modelo pretest–posttest con un solo grupo. Este diseño implicó medir la variable dependiente antes y después de la intervención, sin la presencia de un grupo de control (Campbell & Stanley, 2015). Se utilizó un solo grupo de maceteros con *Urtica dioica L.*, midiendo la concentración inicial de plomo en el suelo (pretest),

sometiendo las muestras al proceso de fitorremediación, y posteriormente registrando la concentración final (postest). Este tipo de diseño es adecuado cuando se evalúa la eficacia inicial de una técnica o tratamiento bajo condiciones controladas de laboratorio.

Este diseño se justifica porque, según Kerlinger y Lee (2002), los diseños preexperimentales son útiles cuando se requiere obtener evidencia preliminar sobre el comportamiento de una variable bajo condiciones determinadas, como ocurre en estudios exploratorios o pruebas piloto de tecnologías ambientales. En esta investigación, se buscó evaluar la capacidad fitorremediadora de *Urtica dioica L.* bajo condiciones controladas antes de avanzar hacia diseños experimentales más complejos.

4.2. Ámbito temporal y espacial

4.2.1. Temporal

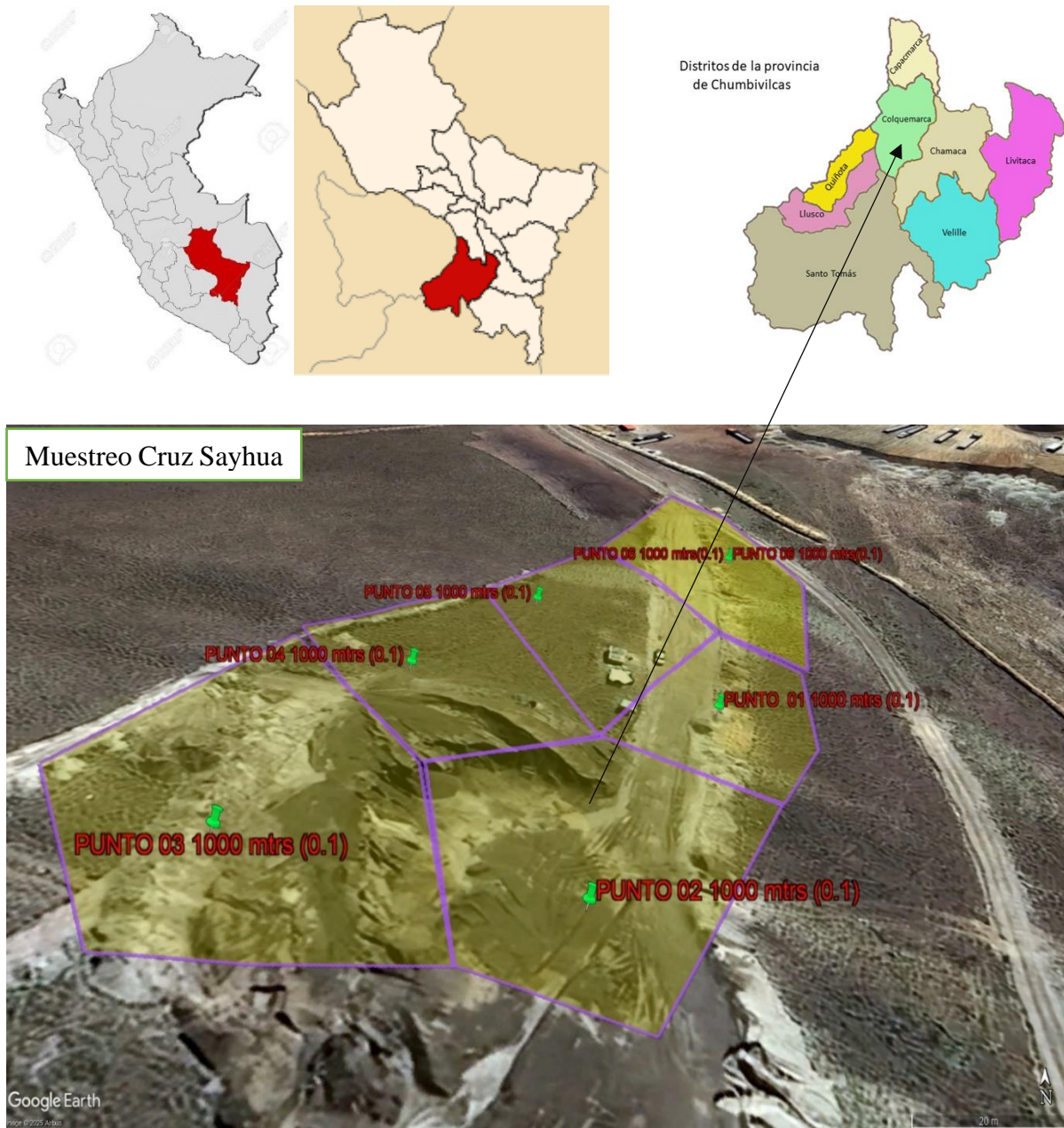
Se realizó en el año 2024, lo que garantiza la actualidad de los datos y la relevancia de las conclusiones para abordar la contaminación del suelo en la actualidad.

4.2.2. Espacial

El estudio se realizó en el sector Cruz Sayhua, perteneciente a la comunidad campesina de Huinquiri, distrito de Colquemarca, provincia Chumbivilcas y departamento del Cusco. Las muestras de suelo se extrajeron de esta localidad específica para analizar la contaminación por plomo y evaluar la eficacia de la fitorremediación utilizando *Urtica dioica L.* (ortiga). Es fundamental destacar que, según el Decreto Supremo N° 011-2017-MINAM, se actualizaron los Estándares de Calidad Ambiental para suelo, lo que requiere una evaluación precisa de los niveles de plomo presentes y una comparación con los límites permitidos. Esta referencia normativa subraya la relevancia de realizar un análisis riguroso y acorde a los estándares vigentes para determinar la efectividad de las técnicas de fitorremediación aplicadas. Las muestras se analizaron en condiciones controladas en el

laboratorio de la Universidad Tecnológica de los Andes (UTEA), Filial Cusco, asegurando la confiabilidad y replicabilidad de los resultados.

El sector Cruz Sayhua ha sido históricamente afectado por actividades extractivas mineras informales y residuos dispersos de pasivos ambientales mineros, lo cual ha generado una acumulación significativa de plomo en el suelo. Estas condiciones motivaron la selección del área para el presente estudio, con el objetivo de evaluar el nivel de contaminación y la viabilidad de aplicar fitorremediación con *Urtica dioica L.* como técnica de recuperación ambiental. Además, se trata de una zona de actividad agrícola comunal, por lo que su restauración representa una prioridad para la salud y seguridad alimentaria de la población local, para evitar condiciones de contaminación, a los pobladores de dicha zona ya que al inicio de la contaminación la población no presentará ningún malestar en su salud esto se verá reflejada con el tiempo, y tal vez para este tiempo tengamos la total ausencia y pérdida de la empresa minera que laboro en dicho lugar, es por eso el motivo de nuestra investigación lo que pretendemos es minimizar los contaminantes del lugar para poder mitigar la contaminación por metales pesado en la zona de extracción minera, una de las técnicas viables y fáciles de realizar de acuerdo a estudios fue la fitorremediación de la ortiga, para la absorción de metales pesado de la zona de impacto, y así liberar la concentración del plomo en el suelo, para proteger la salud de los pobladores y mitigar un pasivo ambiental descontrolado.

Figura 6*Ubicación de la toma de muestras*

Nota. Sector Cruz Sayhua, comunidad campesina de Huiniquiri, distrito de Colquemarca, provincia y departamento de Chumbivilcas, Cusco. Tomado por GPS coordenadas ($14^{\circ}15'18.6''$ S de latitud y $71^{\circ}56'17.6''$ W de longitud).

Características del área afectada y justificación del estudio

El Sector Cruz Sayhua, ubicado en la comunidad campesina de Huiniquiri, distrito de Colquemarca, provincia de Chumbivilcas, Cusco, se caracteriza por presentar zonas de actividad minera artesanal e informal, caminos de tránsito constante de maquinaria pesada y depósitos de material extraído.

Estas actividades han generado procesos de dispersión de partículas contaminantes, principalmente plomo (Pb), a través del viento, la escorrentía superficial y la infiltración en el suelo durante la temporada de lluvias. Además, la proximidad a corrientes de agua superficial aumenta el riesgo de transporte de contaminantes hacia otras zonas.

La selección de este sector como área de estudio se justifica debido a su alto potencial de contaminación ambiental, su cercanía a zonas habitadas y la necesidad de evaluar los niveles de plomo en el suelo para determinar el impacto en la salud de la población y en los ecosistemas locales.

El área de estudio se sectorizó en seis cuadrantes homogéneos de aproximadamente 1000 m² cada uno.

La delimitación se realizó considerando los siguientes criterios técnicos y ambientales:

- **Topografía:** se identificaron áreas planas y con pendientes, priorizando zonas representativas para captar la posible acumulación o dispersión de contaminantes.
- **Uso actual del suelo:** se consideraron zonas con actividad minera, tránsito de maquinaria pesada y depósitos de material removido.
- **Accesibilidad:** se seleccionaron áreas con caminos y espacios transitables para garantizar la toma eficiente de las muestras.

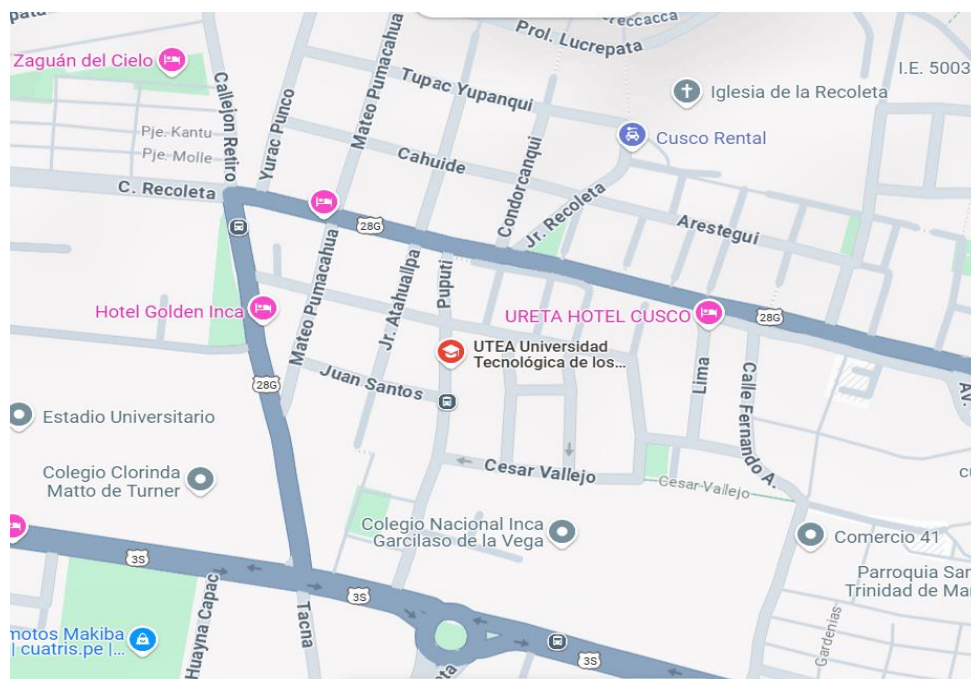
- **Factores ambientales:** se tomó en cuenta la dirección del viento y la ubicación de cuerpos de agua cercanos, que influyen en la dispersión de partículas.

En cada uno de estos seis sectores se seleccionó un punto representativo para realizar el muestreo compuesto de suelo, siguiendo la guía técnica del MINAM (2014). Se usó un transecto, dado que este método está orientado a estudios de gradientes ambientales (como de vegetación), lo cual es el enfoque de este estudio.

Para la toma de muestras de suelo se optó por el **muestreo compuesto** debido a que permite obtener una representación más confiable de la concentración de plomo (Pb) en cada cuadrante del área de estudio. En cada uno de los **seis sectores homogéneos** se recolectaron **cinco submuestras** equidistantes a diferentes puntos del cuadrante, a una profundidad aproximada de **0 a 20 cm**. Estas submuestras se homogenizaron en una sola muestra compuesta por cuadrante, siguiendo los lineamientos de la **Guía para Muestreo de Suelos del MINAM (2014)**. La elección de este método se debe a que la zona presenta **características topográficas y de uso del suelo similares** dentro de cada sector, lo que permite integrar la variabilidad interna y **reducir el error de muestreo**. Además, facilita un análisis más representativo de la contaminación del suelo y optimiza los recursos del estudio.

Figura 7

Ubicación de la realización del trabajo experimental



Nota. Laboratorio de la Universidad Tecnológica de los Andes (UTEA), Filial Cusco, tomada por Google maps coordenadas geográficas ($13^{\circ}31'07.43''S$ de latitud y $71^{\circ}58'02.34''O$ de longitud).

4.3. Población y muestra

El estudio se enfoca en analizar los suelos del sector Cruz Sayhua, utilizando como muestra puntos representativos de esta área específica. Este enfoque de muestreo es esencial para obtener datos confiables sobre las características del suelo contaminado con plomo (Pb). Durante la fase inicial, se recolectaron seis muestras simples distribuidas en un área de 6000 m^2 (0.6 ha), con un peso total aproximado de 100 kg de suelo.

La toma de muestras se realizó conforme al marco legal vigente, en especial el Decreto Supremo N.º 012-2017-MINAM, que establece los Criterios para la gestión de sitios contaminados, y a la Guía de Muestreo de Suelos del MINAM (2014), la cual recomienda un mínimo de cuatro muestras para garantizar la representatividad. Por ello, se recolectaron

seis muestras simples, que fueron **mezcladas homogéneamente para conformar una muestra compuesta**.

La elección de seis puntos de muestreo en un área de 0.6 ha se realizó siguiendo los lineamientos de la “Guía para el Muestreo de Suelos” del Ministerio del Ambiente (MINAM, 2014), la cual establece que para áreas de entre 0.5 ha y 1 ha deben considerarse de 6 a 9 puntos de muestreo para garantizar la representatividad. Esta selección se justificó por la necesidad de obtener una muestra compuesta representativa que permitiera su análisis posterior en condiciones controladas de laboratorio.

Asimismo, se trabajó con muestras blanco (grupo control) consistentes en ortigas cultivadas en suelo limpio, recolectado de una zona sin actividad minera previa, con el fin de establecer una línea base. Estas muestras se analizaron bajo las mismas condiciones de laboratorio y sus resultados fueron incluidos en el análisis estadístico para comparar la acumulación de plomo entre suelos contaminados y no contaminados.

Se optó por el **muestreo compuesto** porque permite **reducir la variabilidad individual entre puntos** y obtener un valor promedio representativo de toda el área afectada, lo cual es crucial en estudios de contaminación ambiental. Este tipo de muestreo se ajusta a los objetivos de la investigación, ya que busca establecer un diagnóstico general del nivel de contaminación por plomo en el suelo, más que identificar focos puntuales. Además, el uso del muestreo compuesto es recomendado por la Guía Técnica del MINAM para zonas con características relativamente homogéneas, como es el caso del terreno estudiado.

Para la toma de muestras se optó por el método de muestreo compuesto, el cual consiste en recolectar varias submuestras individuales de distintos puntos dentro del área de estudio y mezclarlas homogéneamente para formar una sola muestra representativa. Esta

elección se basó en la necesidad de obtener un valor promedio de concentración de plomo en el suelo que reflejara las condiciones generales del sitio, más que analizar variaciones puntuales o espaciales. El muestreo compuesto es apropiado para estudios de contaminación ambiental cuando el objetivo es evaluar la eficacia de un tratamiento (en este caso, la fitorremediación con *Urtica dioica* L.) sobre un área determinada, bajo condiciones controladas de laboratorio. Además, este tipo de muestreo reduce el número de análisis necesarios, optimizando recursos sin comprometer la representatividad de los datos *Decreto Supremo N° 012-2017-MINAM*. (s/f).

Muestra:

La muestra es un subgrupo de la población de interés sobre el cual se recolectan datos, y que tiene que definirse y delimitarse de antemano con precisión, además de que debe ser representativo de la población. (Hernandez, R.et. al. 2013),

Las muestras son el subconjunto de macetas seleccionadas del conjunto de unidades experimentales con *Urtica dioica* a las que se asignaron aleatoriamente tratamientos con suelos contaminados por plomo.

La unidad experimental estuvo constituida por una cantidad fija de suelo previamente homogeneizado que contenía concentraciones naturales de plomo, junto con una planta de *Urtica dioica* cultivada en dicho sustrato, en condiciones de laboratorio. Durante la fase inicial, se recolectaron seis muestras simples de suelo distribuidas en un área de 6000 m² (0.6 ha), obteniendo aproximadamente 100 kg de suelo contaminado proveniente de una zona homogénea. Estas muestras fueron mezcladas para conformar una única muestra compuesta representativa del sitio. A partir de dicha muestra global, y considerando tres grupos representativos del terreno, se distribuyó el suelo en 12 maceteros, utilizando macetas de polietileno con capacidad de 0.5 kg, previamente rellenas con el suelo contaminado homogenizado.

En cada macetero se colocó una plántula seleccionada de *Urtica dioica*, con el propósito de evaluar su capacidad de absorción de plomo durante todo el proceso experimental, desde la etapa inicial hasta la etapa final.

Muestreo:

El muestreo se realizó en la comunidad de Huninquiri, sector Cruz Sayhua, distrito de Colquamarca, provincia de Chumbivilcas, Cusco, en un área total de 6000 m² (0.6 ha). Se empleó un muestreo sistemático, seleccionando seis puntos representativos, distribuidos de manera regular sobre un terreno homogéneo, siguiendo los lineamientos de la Guía de Muestreo de Suelos del MINAM (2014).

4.4. Instrumentos

Se utilizaron dos tipos de instrumentos en la investigación:

- "Ficha de observación": Este instrumento se utilizará para recopilar datos de observaciones realizadas durante el proceso de fitorremediación y experimentación.
- "Experimentación": Se llevarán a cabo experimentos como parte de la investigación para evaluar la eficacia de la fitorremediación utilizando la ortiga en un suelo contaminado por Pb.

4.5. Procedimientos

Para garantizar la seguridad durante el trabajo de campo y laboratorio, se utilizaron Equipos de Protección Personal (EPP) en todas las etapas del proceso. Estos EPP fueron utilizados tanto en la fase de muestreo como en la preparación y análisis de laboratorio:

- **Guantes de Nitrilo:** Para proteger las manos de contacto directo con materiales potencialmente tóxicos y evitar la contaminación de las muestras.
- **Barbijo:** Para prevenir la inhalación de polvos durante el procesamiento de las muestras.

- **Mandil:** Para proteger la ropa del personal de posibles derrames y contaminantes.
- **Cofias Desechables:** Para evitar la caída de cabello en las muestras y mantener la integridad de la investigación.

Recolección de muestras de suelo

Del área mencionada en el muestreo se establecieron 6 puntos (Ver Figura 6) de cada uno de los seis puntos se extrajeron muestras simples de suelo entre 10–30 cm de profundidad, y se recolectó también la vegetación existente (*Urtica dioica* L.). Las seis muestras simples fueron mezcladas homogéneamente para formar una muestra compuesta representativa del área afectada. Esta muestra de suelo fue utilizada para los análisis iniciales de concentración de plomo y para el experimento de fitorremediación en laboratorio.

Todas las muestras fueron etiquetadas con fecha, hora y ubicación, y transportadas siguiendo los protocolos del MINAM para evitar contaminación cruzada. Paralelamente, se recolectaron ortigas “en blanco”, es decir, plantas libres de contaminación, que fueron posteriormente cultivadas en laboratorio sobre el suelo contaminado.

Puntos de Muestreo Detallados:

A continuación, se presenta de manera detallada los puntos de donde se recolectaron las muestras de suelo:

Figura 8

Punto EA-01(0+000-0+1000)



Nota. Punto EA-01(0+000-0+1000): Este es el punto inicial del transecto.

Figura 9

Punto EA-01(0+000-0+1000)



Nota. Punto EA-01(0+000-1+2000): Segundo punto de muestreo, localizado a 1000 metros del punto inicial.

Figura 10

Punto EA-01(0+000-2+3000)



Nota. Punto EA-01(0+000-2+3000): Tercer punto situado a 400 metros del inicio, continuando la línea del transecto.

Figura 11

Punto EA-01(0+000-3+4000)



Nota. Punto EA-01(0+000-3+4000): Cuarto punto de muestreo, a 300 metros del punto de partida.

Figura 12

Punto EA-01(0+000-4+5000)



Nota. Punto EA-01(0+000-4+5000): Quinto punto, ubicado a 500 metros del inicio.

Figura 13

Punto EA-01(0+000-5+6000)



Nota. Punto EA-01(0+000-5+6000): Sexto y último punto del transecto, situado a 500 metros del punto inicial.

Análisis de Laboratorio:

Etapa Inicial

La muestra compuesta de suelo fue analizada en los laboratorios de la UNSAAC y S-Lab Perú, reportándose concentraciones iniciales de plomo de 19,097.33 mg/kg y 19,099.27 mg/kg, valores muy superiores al ECA para suelos agrícolas (140 mg/kg). También se realizó un análisis inicial de la ortiga colectada en campo para determinar la distribución del plomo en hojas, tallos y raíces.

Las muestras de suelo y planta fueron secadas, homogenizadas y preparadas para análisis mediante espectrometría de absorción atómica. En el caso de las ortigas, las muestras se secaron a 60 °C por 72 horas, se trituraron y se sometieron a digestión ácida con H₂SO₄ siguiendo el método EPA 3050B.

Figura 14

Fase Inicial del Laboratorio



Procedimiento Experimental en Laboratorio

Para evaluar la capacidad de fitorremediación de *Urtica dioica* L., se emplearon **12 macetas de polietileno de 0.5 kg**, rellenas con el suelo contaminado previamente homogenizado. En cada maceta se sembró una ortiga “en blanco”. No se añadieron fertilizantes ni agentes quelantes para evitar interferencias.

Las condiciones ambientales fueron controladas cuidadosamente:

Tabla 3

Variables ambientales controladas durante el experimento de fitorremediación en laboratorio

Variable	Valor o Rango Controlado	Método de Control
Temperatura	20–25 °C	Cámara térmica y termómetro digital
Humedad del suelo	60%–70% de capacidad de campo	Riego diario con agua destilada
Fotoperíodo	12 horas de luz / 12 horas de oscuridad	Luz artificial programada
pH del sustrato	7.7–8.1	Medidor de pH de suelo
Riego	Diario (5–10 ml por maceta)	Jeringa dosificadora
Sin enmiendas químicas	N/A	No se aplicaron agentes como EDTA

Nota. Elaboración propia en base a los parámetros establecidos por Viktorova et al. (2016) y los lineamientos de condiciones óptimas para el cultivo de *Urtica dioica L.*

Monitoreo y Evaluaciones Durante el Experimento

Durante los primeros tres meses, se evaluó regularmente el crecimiento de las plantas mediante mediciones de hojas y tallos. Se documentó mediante fotografías cada etapa del experimento para registrar síntomas de estrés y cambios morfológicos.

Se observó que *Urtica dioica L.* no alcanzó su tamaño normal, presentando crecimiento reducido debido al estrés generado por la bioacumulación de plomo.

Posteriormente se realizó un análisis detallado del crecimiento mes a mes, con énfasis en la acumulación de plomo en las distintas partes de la planta (hojas, tallos, raíces).

Análisis Químico Final

Al finalizar el periodo experimental (90–100 días):

- Se realizó el análisis de plomo en las plantas, diferenciando entre hojas, tallos y raíces.

- Se procesaron nuevamente muestras de suelo para evaluar la reducción final de plomo.
- La espectrometría de absorción atómica fue utilizada como método principal de cuantificación.

4.6. Análisis de datos

El análisis estadístico permitió evaluar la eficacia de la fitorremediación con *Urtica dioica* L. en la reducción de plomo en el suelo. Para ello, se aplicó ANOVA para comparar las concentraciones en las distintas etapas del estudio y la prueba de Tukey para identificar diferencias significativas entre los tratamientos. Los datos fueron procesados con IBM SPSS v24, obteniendo estadísticas descriptivas como media y desviación estándar, además de análisis inferenciales. Asimismo, se elaboraron tablas y gráficos para facilitar la interpretación de los resultados y contrastarlos entre el grupo experimental y el control.

4.7. Consideraciones Éticas

Las consideraciones éticas en la investigación sobre "FITORREMEDIACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS POR PLOMO MEDIANTE CULTIVO DE LA *URTICA DIOICA* L. (ORTIGA) EN CONDICIONES DE LABORATORIO, UTEA FILIAL CUSCO EN EL 2024" son fundamentales para garantizar la integridad de la investigación, el respeto por los sujetos involucrados y la credibilidad de los resultados. A continuación, se presentan algunas consideraciones éticas clave:

- **Consentimiento informado:** Si la investigación involucra la participación de personas, es esencial recabar los consentimientos informados de cada uno de los intervinientes en la investigación. Deben comprender claramente cada objetivo a ser estudiado, el procedimiento, el riesgo potencial y el beneficio esperado antes de dar su consentimiento.

- **Confidencialidad:** Los datos recopilados de los participantes deben manejarse con confidencialidad. Es importante garantizar que la información personal no se divulgue sin el consentimiento de los participantes y que se utilicen métodos seguros de almacenamiento de datos.
- **Respeto por la autonomía:** Cada participante deberá poseer la facultad para el retiro de la investigación en cualquier etapa sin sufrir algún tipo de consecuencia negativa. Se debe respetar su autonomía y elección.
- **Beneficencia y no maleficencia:** Beneficencia y no maleficencia: El estudio debe orientarse a generar conocimiento útil y aportar al bienestar general, procurando no causar daños a las personas ni al ambiente. Se deben minimizar los riesgos potenciales para los participantes y asegurarse de que los beneficios superen cualquier riesgo.
- **Evaluación ética:** Se requiere la existencia de que un comité de ética otorgue la aprobación de la pesquisa con anterioridad a ser ejecutada. Estos comités revisan el diseño de la investigación, los procedimientos y los aspectos éticos, con el fin de asegurar el cumplimiento de los estándares establecidos.
- **Transparencia en la divulgación de resultados:** Los resultados deben comunicarse de forma clara y honesta, sean positivos o negativos. La manipulación o presentación sesgada de los datos no es ética en la investigación.
- **No daño al medio ambiente:** Durante el desarrollo del estudio se deben tomar cuidados para evitar afectar innecesariamente el entorno natural.
- **Conflictos de intereses:** Si existiera alguna situación que pueda influir en los resultados o su interpretación, debe informarse con total transparencia.
- **Ética en la publicación:** Si los resultados se publican, es importante respetar las normas de las revistas científicas y reconocer correctamente la autoría.

- **Responsabilidad social:** La investigación debe pensarse también en función de su aporte a la sociedad y al cuidado del ambiente.

V. Resultados y Discusión

5.1. Resultados

OE1. Nivel de concentración inicial de plomo en los suelos del sector Cruz Sayhua

Antes de iniciar la evaluación del efecto de *Urtica dioica* L. sobre la recuperación del suelo, se determinó la concentración inicial de plomo presente en las muestras del sector Cruz Sayhua. Para ello, las muestras fueron analizadas en dos laboratorios certificados (UNSAAC y S-Lab), con el fin de asegurar resultados confiables. En la **Tabla 4** se presentan las concentraciones iniciales de plomo en el suelo y su comparación con los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para suelo establecidos por el MINAM (2017).

Tabla 4

Concentración inicial de plomo en muestras de suelo y comparación con los ECA para Suelo

Laboratorio	Parámetro	Unidad	Resultado (mg/kg)	ECA para suelo agrícola (mg/kg)	ECA para suelo residencial /parque	ECA para suelo comercial/industrial (mg/kg)	¿Cumple con ECA?
UNSAAC	Plomo (Pb)	mg/kg	19,097.33	70	140	800	Supera los ECA Suelo.
S-Lab	Plomo (Pb)	mg/kg	19,099.27	70	140	800	Supera los ECA Suelo.

Los resultados evidencian que las concentraciones iniciales de plomo fueron de 19 097.33 mg/kg y 19 099.27 mg/kg, valores que superan ampliamente los límites permisibles establecidos por los ECA para suelos agrícolas (70 mg/kg), residenciales y parques (140 mg/kg), así como para suelos comerciales e industriales (800 mg/kg). En términos comparativos, estas concentraciones exceden los límites agrícolas en más de 270 veces, los residenciales en más de 130 veces y los comerciales e industriales en más de 23 veces.

La similitud de los valores obtenidos por ambos laboratorios, empleando el método de espectrometría de absorción atómica, confirma que los resultados reflejan una condición

real de contaminación severa del suelo por plomo y no un error de medición. Esta homogeneidad en los valores obtenidos permitió establecer una línea base confiable del estado inicial del suelo.

En consecuencia, los suelos del sector Cruz Sayhua presentan una condición inicial de contaminación severa por plomo, lo que justificó la aplicación del tratamiento de fitorremediación con *Urtica dioica* L., sin que sea necesario el planteamiento ni la contrastación de una hipótesis estadística para esta condición inicial, ya que dicha contaminación fue previamente confirmada mediante análisis de laboratorio y comparación normativa.

OE2. Reducción de la concentración de plomo en el suelo después del tratamiento con *Urtica dioica* L.

A continuación se presentan los resultados relacionados con la disminución de la concentración de plomo en los suelos contaminados del sector Cruz Sayhua después del cultivo de *Urtica dioica* L.. Para ello, las muestras fueron analizadas en los laboratorios UNSAAC y S-Lab, tanto antes como después del tratamiento, con el fin de cuantificar la eficiencia del proceso de fitorremediación. Los resultados permitieron evaluar el grado de reducción del contaminante en cada muestra y contrastar la hipótesis específica 2, la cual plantea que la concentración de plomo disminuye tras el tratamiento con *Urtica dioica* L.

Tabla 5

Reducción de Plomo en Suelo – UNSAAC

Muestra	Concentración Inicial (ppm)	Concentración Final (ppm)	Reducción (%)
Suelo 1	15940,32	5999,99	62,36
Suelo 2	12501,21	6001,21	52,00
Suelo 3	13254,51	5954,58	55,07

En la **Tabla 5** se presenta los resultados de la reducción de plomo en las muestras de suelo analizadas por el laboratorio UNSAAC. Los datos mostraron que el tratamiento

aplicado permitió disminuir significativamente la concentración de plomo en todas las muestras. En el Suelo 1, la concentración se redujo de 15 940.32 ppm a 5 999.99 ppm, lo que representó una reducción del 62.36 %. En el Suelo 2, la concentración inicial de 12 501.21 ppm descendió a 6 001.21 ppm, equivalente a una disminución del 51.99 %. En el Suelo 3, la concentración pasó de 13 254.51 ppm a 5 954.58 ppm, logrando una reducción del 55.08 %. En conjunto, los resultados evidenciaron una eficiencia de remoción de plomo superior al 50 % en todas las muestras.

Tabla 6

Reducción de Plomo en Suelo – Laboratorio S-lab

Muestra	Concentración Inicial (ppm)	Concentración Final (ppm)	Reducción (%)
Suelo 1	14920,12	5999,12	59,75
Suelo 2	12401,89	6102,34	50,78
Suelo 3	13100,78	5985,45	54,32

La **Tabla 6** muestra los resultados de la reducción de plomo en las muestras de suelo analizadas por el laboratorio S-Lab. Los datos indican que el tratamiento aplicado permitió disminuir significativamente la concentración de plomo en todas las muestras evaluadas. En el Suelo 1, la concentración se reduce de 14 920.12 ppm a 5 999.12 ppm, equivalente a una reducción del 59.75 %. En el Suelo 2, la concentración disminuye de 12 401.89 ppm a 6 102.34 ppm, logrando una reducción del 50.78 %. En el Suelo 3, la concentración baja de 13 100.78 ppm a 5 985.45 ppm, con una reducción del 54.32 %. En conjunto, los resultados muestran eficiencias de remoción superiores al 50 % en todas las muestras analizadas.

Tabla 7

Reducción de la concentración de plomo en el suelo

Muestra	Concentración Inicial (ppm)	Concentración Final (ppm)	Reducción (%)
Suelo 1	15940,32	5999,99	62,36%
Suelo 2	12501,21	6001,21	52,00%
Suelo 3	13254,51	5954,58	55,07%

La **Tabla 7** presenta los resultados de la reducción del plomo en el suelo tras el tratamiento con *Urtica dioica*. Se observa que el Suelo 1 alcanzó la mayor eficiencia, reduciendo su concentración inicial de 15,940.32 ppm a 5,999.99 ppm, lo que representa una disminución del 62.36%. El Suelo 3 mostró una reducción del 55.07% (de 13,254.51 ppm a 5,954.58 ppm), mientras que el Suelo 2 obtuvo el menor porcentaje de remoción (52.00%), al pasar de 12,501.21 ppm a 6,001.21 ppm.

Estos resultados indican que la eficacia de la fitorremediación varía según las características del suelo y la concentración inicial de contaminante. Sin embargo, en los tres casos se logró una reducción superior al 50%, lo cual es significativo si se considera que no se utilizaron agentes quelantes como EDTA. Esto demuestra el alto potencial de *Urtica dioica L.* como planta fitoextractora, capaz de remover concentraciones considerables de plomo del suelo en condiciones controladas.

Tabla 8

Evolución de la concentración de plomo en suelo y plantas en laboratorio

Muestra	Resultado 1 (ppm)	Resultado 2 (ppm)	Resultado 3 (ppm)	Resultado 4 (ppm)
Suelo 1	15940,32	6540,32	5999,99	9940,32
Suelo 2	12501,21	6201,21	6001,21	7851,21
Suelo 3	13254,51	6354,51	5954,58	8564,51

La **Tabla 8** muestra la evolución de la concentración de plomo en el suelo durante los ensayos en laboratorio. Se observa una reducción progresiva en todos los suelos desde el Resultado 1 hasta el Resultado 3, lo que confirma un proceso activo de remediación. Sin embargo, el Resultado 4 presenta un leve incremento en la concentración de plomo en algunos casos (como en el Suelo 1 y Suelo 3), lo que podría atribuirse a la redistribución del metal en la matriz del suelo, la saturación en la capacidad de absorción de la planta o la posible lixiviación de contaminantes en el medio de cultivo. El caso particular del Suelo 2, que inicialmente presentaba una concentración de 12,501.21 ppm y una reducción hasta

6,001.21 ppm, sugiere una variabilidad en la eficiencia de remediación, posiblemente por factores como el pH, la composición mineral del suelo o la disponibilidad del metal en forma bioaccesible.

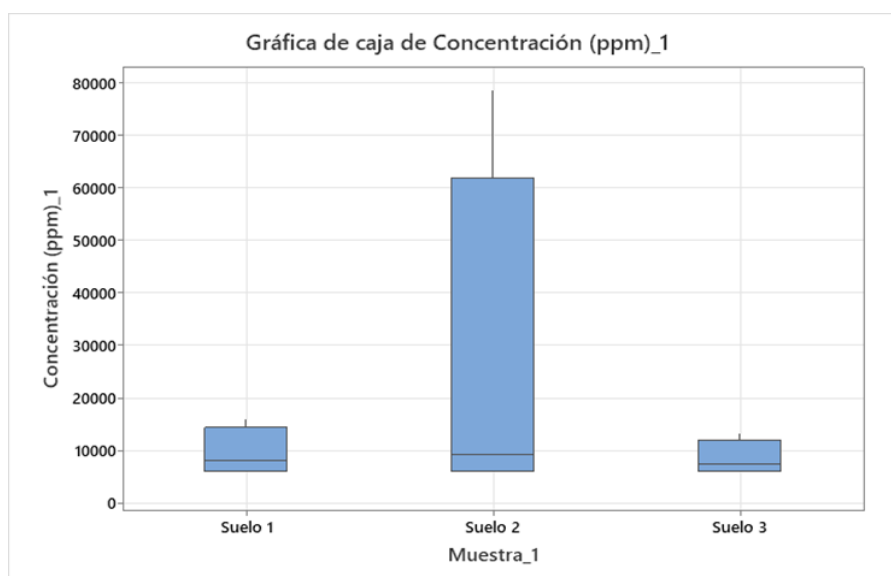
Tabla 9

Estadísticas de la concentración de plomo en el suelo

Variable	Muestras	N	Media	Desv.Est.	CoefVar
Concentración (ppm)_1	Suelo 1	4	9605,24	4569,36	47,57
	Suelo 2	4	25801,2	35262,7	136,67
	Suelo 3	4	8532,03	3351,01	39,28

Figura 15

Estadísticas de la concentración de plomo en el suelo.



La **Tabla 9** resume las estadísticas de la concentración de plomo en diferentes muestras de suelo. El Suelo 2 presenta la concentración promedio más alta (25,801.2 ppm) y un coeficiente de variación elevado (136.67%), indicando una mayor dispersión y heterogeneidad en los datos. En contraste, el Suelo 3 tiene la concentración promedio más baja (8532.03 ppm) y el menor coeficiente de variación (39.28%), lo que refleja mayor uniformidad en las mediciones. El Suelo 1, con una concentración promedio intermedia

(9605.24 ppm) y un coeficiente de variación de 47.57%, muestra una moderada variabilidad en comparación con las otras muestras. Estas diferencias en las concentraciones y variaciones pueden estar influenciadas por factores como la distribución inicial de plomo, la heterogeneidad del suelo y las condiciones experimentales. La información es crucial para entender el impacto de las características del suelo en la eficacia de la remediación.

OE3. Absorción y acumulación en la planta

Para evaluar la capacidad de *Urtica dioica* L. de absorber y acumular plomo en sus tejidos, se presentan los resultados del análisis de la concentración del metal en raíz, tallo, hojas y planta completa. Estos datos permitieron determinar el patrón de distribución interna del plomo y establecer el tipo de fitorremediación predominante durante el experimento.

Tabla 10

Estadísticas de la concentración de plomo en plantas

Variable	Muestra	Media (ppm)	Desv. Est.	Coef. Var (%)
Concentración Pb	Planta 1	4401.51	951.736	21.62
Concentración Pb	Planta 2	4950.73	957.307	19.34
Concentración Pb	Planta 3	4530.69	1216.36	26.85

En la **Tabla 10** se evidencia que la Planta 2 presentó la mayor acumulación promedio de plomo (4.950,73 ppm), seguida por la Planta 3 (4.530,69 ppm) y la Planta 1 (4.401,51 ppm). Sin embargo, la variabilidad en la absorción del plomo entre las muestras es evidente al analizar el coeficiente de variación (% CV). La Planta 2 tiene la menor variabilidad (19,34%), lo que indica que su proceso de absorción fue más homogéneo y constante. En cambio, la Planta 3 tiene el coeficiente de variación más alto (26,85%), lo que sugiere diferencias en la distribución del metal dentro de la planta o variabilidad en su interacción con el suelo. La Planta 1, con un coeficiente de variación de 21,62%, muestra un comportamiento intermedio en términos de estabilidad en la absorción de plomo. Estos resultados destacan que, aunque *Urtica dioica* presenta una capacidad general para acumular

plomo, existen diferencias en su eficiencia de absorción, las cuales pueden estar influenciadas por factores como la biomasa, la disponibilidad del metal en el suelo y las condiciones ambientales del experimento.

Tabla 11

Relación entre la concentración de plomo en el suelo y la planta completa

Concentración de Plomo en el Suelo (mg/kg)	Concentración Total en la Planta (mg/kg)	Porcentaje de Absorción (%)
15940,32	6489,11	40,72
12501,21	6148,02	49,16
13254,51	6608,12	49,84

En la **Tabla 11** se observa que la capacidad de la planta para absorber plomo desde el suelo varía entre 40,72% y 49,84%, con un promedio de casi el 50% de absorción del metal disponible en el suelo. Esto indica que *Urtica dioica* tiene un alto potencial de fitoextracción, capturando una fracción significativa del plomo presente en su entorno. La Planta 3 presenta la mayor eficiencia de absorción (49,84%), lo que sugiere que las condiciones del suelo en este caso fueron más favorables para la captación del metal, posiblemente debido a una mayor biodisponibilidad del plomo o diferencias en la biomasa radicular. En contraste, la Planta 1 mostró la menor absorción (40,72%), lo que puede estar asociado a factores como la saturación de plomo en el sustrato o diferencias en la capacidad fisiológica de la planta para retener metales pesados.

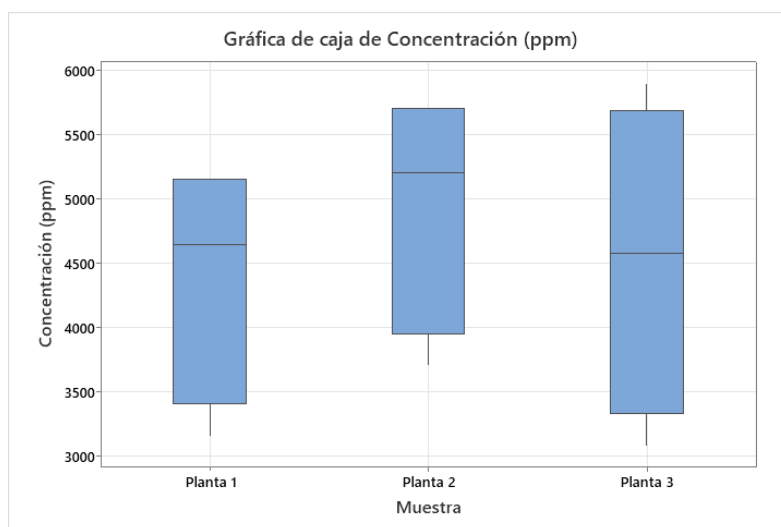
Tabla 12

Estadísticas de la concentración de plomo en las plantas

Estadísticas					
Variable	Muestra	N	Media	Desv.Est.	CoefVar
Concentración (ppm)	Planta 1	4	4401,51	951,736	21,62
	Planta 2	4	4950,73	957,307	19,34
	Planta 3	4	4530,69	1216,36	26,85

Figura 16

Estadísticas de la concentración de plomo en las plantas



La **Tabla 12** muestra la concentración promedio de plomo acumulada en las plantas de *Urtica dioica L*, con valores que oscilan entre 4401,51 ppm (Planta 1) y 4950,73 ppm (Planta 2). La Planta 2 se destaca por tener la mayor acumulación promedio y la menor variabilidad relativa (19,34%), lo que indica una distribución más uniforme de plomo entre sus tejidos. En contraste, la Planta 3 presenta la mayor variabilidad (26,85%), reflejando diferencias significativas en la acumulación de plomo. La Planta 1, con un coeficiente de variación del 21,62%, muestra una variabilidad intermedia. Estos resultados sugieren que, aunque todas las plantas acumulan cantidades relevantes de plomo, las diferencias en consistencia podrían estar influenciadas por factores como la biomasa y el contacto con el suelo, destacando la importancia de optimizar las condiciones de cultivo para aplicaciones en fitorremediación.

Tabla 13

Estadísticas de la acumulación de plomo en las hojas y total.

Muestra	Plomo en Hojas (mg/kg)	Plomo Total Acumulado (mg/kg)	Porcentaje en Hojas (%)
Planta 1	3392,12	6489,11	52,3
Planta 2	3250,5	6148,02	52,9
Planta 3	3402,3	6608,12	51,5

La **Tabla 13** presenta la distribución del plomo acumulado en las hojas y el total acumulado en cada planta de *Urtica dioica L.*, evidenciando tanto su capacidad fitoacumuladora como el tipo de fitorremediación que ejecuta cada una. Las hojas concentran más del 50% del plomo absorbido en las tres plantas, lo cual confirma que el mecanismo predominante es la **fitoextracción**, dado que el metal se transloca desde las raíces hacia la parte aérea, principalmente a las hojas. La Planta 1 registra un 52,3% de plomo acumulado en hojas, mostrando un comportamiento consistente con la **fitoextracción activa**, ya que moviliza el metal hacia la biomasa aérea y alcanza un total de 6489,11 mg/kg. La Planta 2 presenta el porcentaje más alto de acumulación foliar (52,9%), lo que indica una **fitoextracción más eficiente**, probablemente asociada a una mayor capacidad de translocación. La Planta 3, aunque exhibe el porcentaje más bajo en hojas (51,5%), logra la mayor acumulación total (6608,12 mg/kg); en este caso, se evidencia una combinación de **fitoextracción y fitoestabilización parcial**, ya que retiene una fracción importante en raíces, pero continúa trasladando un volumen significativo a las hojas.

En conjunto, el patrón observado demuestra que *Urtica dioica L.* funciona predominantemente como **fitoextractora**, utilizando las hojas como sitio principal de acumulación del plomo, y que la variación en los porcentajes de cada planta permite identificar el grado de eficiencia de los mecanismos de fitorremediación involucrados.

Tabla 14*Acumulación de Plomo en Diferentes Tejidos de la Planta*

Tejido Vegetal	Planta 1 (mg/kg)	Planta 2 (mg/kg)	Planta 3 (mg/kg)	Promedio (mg/kg)
Raíces	1586,5	1495,3	1685,22	1589,67
Tallos	1511,49	1402,22	1520,6	1478,1
Hojas	3392,12	3250,5	3402,3	3348,97
Planta Completa	6489,11	6148,02	6608,12	6415,08

La **Tabla 14** presenta la acumulación de plomo (Pb) en los distintos tejidos vegetales de *Urtica dioica L.* (raíces, tallos y hojas), evaluada en tres muestras (Plantas 1, 2 y 3). Se observa que las hojas presentan la mayor concentración promedio de plomo (3348,97 mg/kg), seguidas por las raíces (1589,67 mg/kg) y los tallos (1478,10 mg/kg). En conjunto, la planta completa acumuló en promedio 6415,08 mg/kg. Estos resultados revelan un patrón claro de distribución diferencial del plomo dentro de la planta. La alta concentración en hojas indica que *Urtica dioica L.* actúa principalmente mediante fitoextracción, al acumular el metal en sus órganos aéreos, lo cual facilita su remoción mediante cosecha. Por otro lado, la presencia significativa de plomo en las raíces también sugiere un componente de fitoestabilización, al inmovilizar parte del contaminante en la rizosfera y limitar su movilidad en el suelo.

Tabla 15*Relación entre Concentración de Plomo en el Suelo y la Planta Completa*

Muestra	Concentración de Plomo en el Suelo (mg/kg)	Concentración Total en la Planta (mg/kg)	Porcentaje de Absorción (%)
Planta 1	15940,32	6489,11	40,72
Planta 2	12501,21	6148,02	49,16
Planta 3	13254,51	6608,12	49,84

La **Tabla 15** muestra la relación entre la concentración de plomo en el suelo y su absorción total por la planta completa de *Urtica dioica L.* Se observa que la Planta 1, cultivada en suelo con la mayor concentración de plomo (15940,32 mg/kg), absorbió

6489,11 mg/kg, lo que equivale al 40,72% del plomo disponible. Por otro lado, las Plantas 2 y 3, cultivadas en suelos con menores concentraciones iniciales de plomo (12501,21 mg/kg y 13254,51 mg/kg, respectivamente), alcanzaron porcentajes de absorción más altos, del 49,16% y 49,84%, respectivamente. Estos datos indican que *Urtica dioica* L. tiene una capacidad eficiente de absorber plomo del suelo, logrando altos porcentajes de acumulación incluso en condiciones de menor disponibilidad del metal. Este patrón sugiere que la planta mantiene un mecanismo activo de absorción de metales pesados, lo que la hace viable para procesos de fitorremediación en suelos contaminados.

Tabla 16

Acumulación de plomo en diferentes tejidos de Urtica dioica

Código de Laboratorio	Parámetro	Unidad	LCM	Resultado (mg/kg)	Tejido Vegetal
S-3873	Plomo, Pb	mg/kg	3.00	1586.50	Raíz
S-3874	Plomo, Pb	mg/kg	3.00	1511.49	Tallo
S-3875	Plomo, Pb	mg/kg	3.00	3392.12	Hojas

En la **Tabla 16** se presenta los resultados de la acumulación de plomo en los diferentes tejidos de *Urtica dioica*. Los análisis mostraron que la concentración más elevada se encontró en las hojas, con un valor de 3 392.12 mg/kg, seguida por la raíz, que registró 1 586.50 mg/kg. El tallo presentó la menor concentración, con 1 511.49 mg/kg. Estos resultados indicaron que *Urtica dioica* acumuló plomo en todos sus tejidos, evidenciando un mayor grado de bioacumulación en las hojas.

Tabla 17

Relación entre concentración de plomo en hojas, tallo y raíz

Muestra	Plomo en Hojas (mg/kg)	Plomo en Tallo (mg/kg)	Plomo en Raíz (mg/kg)
Planta 1	3392,12	1511,49	1586,5
Planta 2	3250,5	1402,22	1495,3
Planta 3	3402,3	1520,6	1685,22

La **Tabla 17** desglosa la acumulación de plomo en los distintos órganos de la planta, confirmando que las hojas son el principal reservorio del metal. La mayor concentración de plomo se encontró en las hojas (3.392,12 mg/kg en la Planta 1 y valores similares en las demás muestras), seguidas por la raíz (1.685,22 mg/kg en la Planta 3) y, finalmente, el tallo, que presentó los valores más bajos (1.402,22 mg/kg a 1.520,6 mg/kg). Estos resultados sugieren que *Urtica dioica* actúa predominantemente como una planta fitoextractora, acumulando el metal en sus partes aéreas, lo que facilita su remoción mediante cosecha. Además, la presencia significativa de plomo en la raíz indica que la planta también ejerce un papel en la fitoestabilización, reteniendo parte del contaminante en su sistema radicular y limitando su dispersión en el ambiente.

Tabla 18

Diferencias entre la concentración antes y después del tratamiento

Aspecto Evaluado	Laboratorio – UNSAAC	Laboratorio – S-Lab	Concentración de Pb en planta
Variable Principal	Reducción de plomo en suelo	Reducción de plomo en suelo	Absorción de plomo en planta
Método de Evaluación	Espectrometría de absorción atómica	Espectrometría de absorción atómica	Análisis de tejidos vegetales
Concentración inicial de Pb (mg/kg)	19,097.33	19,099.27	No aplica
Concentración final de Pb (mg/kg)	7,200.85	7,670.45	No aplica
Promedio de reducción (%)	62.36%	59.75%	40% – 50% de absorción en planta
Parte más afectada	Suelo (reducción por degradación y absorción)	Suelo (reducción por degradación y absorción)	Hojas (más del 50% del plomo absorbido)
Factores Externos	Controlados en laboratorio (pH, humedad y nutrientes regulados)	Controlados en laboratorio (pH, humedad y nutrientes regulados)	Variabilidad del suelo y clima

En la **Tabla 17** se observa que la concentración de plomo en el suelo presentó una reducción significativa después del cultivo de ortiga tanto en el Laboratorio UNSAAC como en el Laboratorio S-Lab, alcanzando disminuciones del 62.36% y 59.75%, respectivamente.

Estos valores indican que, bajo condiciones ambientales de laboratorio, el suelo homogenizado presentó una respuesta similar al proceso de fitorremediación. Asimismo, la absorción de plomo por la planta mostró niveles entre 40% y 50%, concentrándose principalmente en las hojas, donde se acumuló más del 50% del metal absorbido. La disminución del plomo en el suelo se explica por el proceso combinado de absorción radicular y degradación en el sustrato, mientras que la mayor acumulación en tejidos foliares confirma el comportamiento bioacumulador característico de la ortiga.

Prueba de hipótesis

Hipótesis específica 1

No aplica. El objetivo específico 1 corresponde a una caracterización inicial del suelo.

Hipótesis específica 2

H₁: La concentración de plomo en los suelos del sector Cruz Sayhua disminuye tras el cultivo de *Urtica dioica* L. durante el año 2024.

H₀: La concentración de plomo en los suelos del sector Cruz Sayhua no disminuye tras el cultivo de *Urtica dioica* L. durante el año 2024.

Tabla 19

Análisis de varianza para el suelo

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Suelo	2	659662	329831	0,3	0,748
Error	9	9905306	1100590		
Total	11	10564968			

La **Tabla 19** muestra los resultados del análisis de varianza (ANOVA) aplicado a los datos de concentración de plomo en los tres suelos (Suelo 1, Suelo 2 y Suelo 3). El valor F obtenido es 0,3 y el valor p es 0,748, lo que indica que no existen diferencias estadísticamente significativas entre las medias de concentración de plomo en los suelos evaluados, ya que el valor p es superior al nivel de significancia $\alpha = 0,05$. Esto sugiere que

cualquier diferencia observada en las concentraciones de plomo entre los suelos podría atribuirse a la variabilidad natural o al azar, y no a un efecto sistemático.

Tabla 20

Tukey para suelo

Suelo	N	Media	Agrupación
SUELO 2	4	4951	A
SUELO 3	4	4531	A
SUELO 1	4	4402	A

En la **Tabla 20**, la prueba de Tukey se utilizó para comparar las medias de concentración de plomo entre los tres suelos. Los resultados muestran medias de 4951 ppm para el Suelo 2, 4531 ppm para el Suelo 3 y 4402 ppm para el Suelo 1. Todas las medias fueron agrupadas bajo la misma letra (A), lo que indica que no hay diferencias significativas entre los suelos en cuanto a la concentración de plomo.

A partir de los resultados obtenidos, el ANOVA mostró que no existen diferencias significativas entre los tres suelos evaluados después del cultivo, lo que indica que las plantas absorbieron plomo de manera similar en cada uno de ellos. Sin embargo, la comparación entre los valores iniciales y finales evidencia una disminución clara en la concentración de plomo en todos los suelos tras el cultivo de *Urtica dioica L.* Por ello, se **rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa**, concluyendo que el cultivo de *Urtica dioica L.* sí contribuyó a reducir la concentración de plomo en los suelos del sector Cruz Sayhua durante el año 2024.

Hipótesis específica 3

H₁: La *Urtica dioica L.* absorbe y acumula plomo en sus tejidos (raíces, tallos y hojas) cuando es cultivada en los suelos contaminados del sector Cruz Sayhua durante el año 2024.

H₀: La *Urtica dioica L.* no absorbe ni acumula plomo en sus tejidos (raíces, tallos y hojas) cuando es cultivada en los suelos contaminados del sector Cruz Sayhua durante el año 2024.

Tabla 21

Análisis de varianza para planta

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Planta	2	659662	329831	0,3	0,748
Error	9	9905306	1100590		
Total	11	10564968			

La **Tabla 21** muestra los resultados del análisis de varianza (ANOVA) aplicado para evaluar las diferencias en la concentración de plomo entre las tres plantas (Planta 1, Planta 2 y Planta 3). El valor F obtenido fue 0,3 y el valor p resultante fue 0,748, lo que indica que no hay diferencias estadísticamente significativas entre las medias de concentración de plomo de las plantas, dado que el valor p es mayor que el nivel de significancia $\alpha = 0,05$. Esto significa que las diferencias observadas en las concentraciones de plomo entre las tres plantas no son suficientemente grandes como para descartar la posibilidad de que se deban al azar o a la variabilidad experimental.

Tabla 22

Tukey diferencias para planta

Planta	N	Media	Agrupación
PLANTA 2	4	4951	A
PLANTA 3	4	4531	A
PLANTA 1	4	4402	A

La **Tabla 22** presenta los resultados de la prueba de Tukey, utilizada para comparar las medias de las tres plantas de forma individual. Las medias de concentración de plomo obtenidas fueron 4951 ppm para la Planta 2, 4531 ppm para la Planta 3 y 4402 ppm para la Planta 1. Todas las plantas se agruparon bajo la misma letra (A), lo que confirma que no existen diferencias significativas entre ellas. Esta prueba refuerza los resultados del ANOVA, evidenciando que las plantas muestran un comportamiento estadísticamente

similar en cuanto a la acumulación de plomo. En conclusión, tanto el ANOVA como la prueba de Tukey demuestran que las tres plantas no presentan diferencias relevantes en la concentración de plomo absorbido bajo las condiciones experimentales evaluadas.

El ANOVA y la prueba de Tukey muestran que no existen diferencias significativas entre las tres plantas, lo cual indica que todas acumularon plomo en niveles similares. Debido a que las plantas sí presentan concentración de plomo en sus tejidos, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa, concluyendo que *Urtica dioica* L. absorbe y acumula plomo cuando es cultivada en los suelos contaminados del sector Cruz Sayhua.

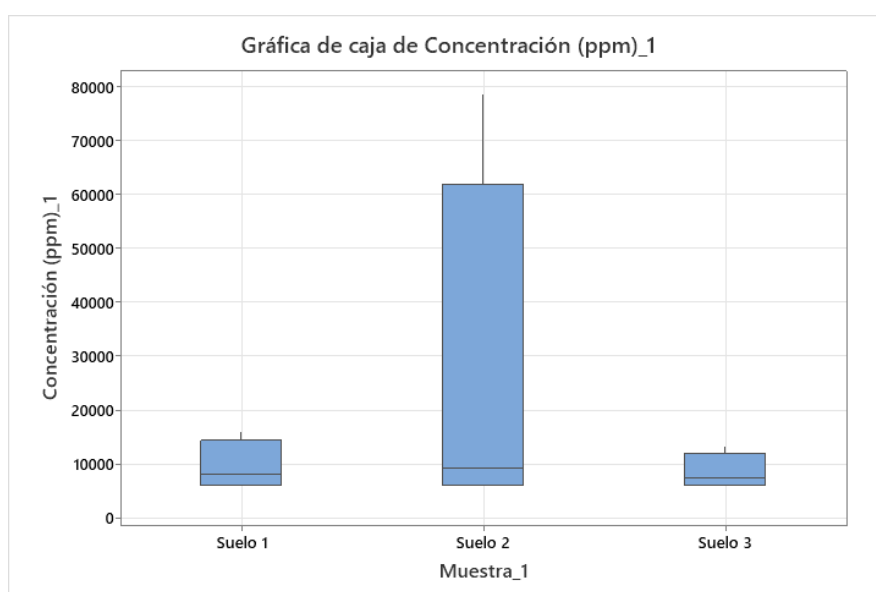
Tabla 23

Estadísticas de la concentración de plomo en el suelo

Variable	Muestras	N	Media	Desv.Est.	CoefVar
Concentración (ppm)_1	Suelo 1	4	9605,24	4569,36	47,57
	Suelo 2	4	25801,2	35262,7	136,67
	Suelo 3	4	8532,03	3351,01	39,28

Figura 17

Estadísticas de la concentración de plomo en el suelo.



La **Tabla 23** resume las estadísticas de la concentración de plomo en diferentes muestras de suelo. El Suelo 2 presenta la concentración promedio más alta (25,801.2 ppm) y un coeficiente de variación elevado (136.67%), indicando una mayor dispersión y heterogeneidad en los datos. En comparación, el Suelo 3 presenta la concentración promedio más baja (8532.03 ppm) y también la menor variación entre sus mediciones (39.28%), lo que indica resultados más uniformes. En cambio, el Suelo 1 muestra un valor intermedio (9605.24 ppm) y una variación de 47.57%, lo que refleja diferencias un poco más marcadas en sus mediciones. Estas variaciones pueden estar relacionadas con cómo se distribuye el plomo en el suelo, la naturaleza no homogénea del terreno y las condiciones del experimento. En conjunto, esta información ayuda a entender mejor cómo el tipo de suelo puede influir en la eficacia de la remediación.

5.2. Discusión

Los resultados obtenidos en cuanto a la caracterización del suelo del sector Cruz Sayhua evidenció una condición de contaminación severa por plomo, con concentraciones que superan ampliamente los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para suelo establecidos por el MINAM. Estos resultados reflejan la magnitud del problema ambiental en la zona y evidencian un posible riesgo para el ambiente y la salud de las personas. La coincidencia entre los dos laboratorios certificados también da mayor confianza a los datos obtenidos y permite contar con una base más sólida para evaluar el proceso de fitorremediación. Además, estos hallazgos son coherentes con lo reportado por Paredes (2021) y Yacolca (2017), quienes encontraron niveles altos de plomo en suelos afectados por actividad minera, señalando que este tipo de contaminación suele mantenerse en el tiempo y es difícil de revertir de forma natural.

Respecto al tratamiento con *Urtica dioica* L., los resultados evidencian una reducción clara del plomo en el suelo, con eficiencias superiores al 50 % en todas las

muestras. Esto muestra que la especie tiene la capacidad de disminuir este metal incluso sin recurrir a agentes quelantes como el EDTA. Estos hallazgos coinciden con lo señalado por Díaz (2017) y Castro (2020), quienes indican que las especies del género *Urtica* toleran bien el plomo y pueden acumularlo, sobre todo en condiciones controladas. A diferencia de estudios donde el uso de EDTA puede aumentar la movilidad del metal y generar riesgos de lixiviación, aquí se observa que trabajar sin quelantes puede ser una opción más segura para el ambiente.

La variación en la reducción del plomo entre las muestras parece estar relacionada con factores como la cantidad inicial del contaminante, las diferencias propias de cada suelo y la disponibilidad del metal para ser absorbido. En esa línea, Quincho & Saldaña (2023) mencionan que cuando el suelo tiene más plomo desde el inicio, la planta puede llegar a absorber mayores cantidades, siempre que sea capaz de tolerarlo.

En cuanto a la absorción y acumulación de plomo en la planta, los resultados muestran que *Urtica dioica* L. distribuye el metal de manera desigual en sus tejidos, acumulándose principalmente en las hojas, luego en las raíces y en menor cantidad en los tallos. Esto indica que el proceso predominante es la fitoextracción, ya que el plomo se moviliza desde las raíces hacia la parte aérea, lo que permite su eliminación al cosechar la biomasa. Este comportamiento coincide con lo señalado por Ortiz y Rojas (2022) y Camones (2023), quienes también reportan que las especies del género *Urtica* tienen una buena capacidad para extraer metales pesados como cadmio, plomo y arsénico.

Sin embargo, una parte importante del plomo también se queda en las raíces, lo que sugiere que la planta no solo lo extrae, sino que también ayuda a inmovilizarlo en el suelo. De esta manera, se reduce su movilidad y su posible impacto en el ambiente. Esto coincide con lo señalado por Silva (2017), quien menciona que la ortiga puede comportarse tanto

como fitoextractora como fitoestabilizadora, dependiendo del suelo y del metal con el que interactúe.

Finalmente, aunque la reducción de plomo en el suelo fue importante, las concentraciones finales aún superan los límites establecidos por los ECA para suelo. Esto indica que la fitorremediación con *Urtica dioica* L. no es un proceso inmediato, sino progresivo, y que probablemente requiere más de un ciclo de cultivo o su combinación con otras técnicas para lograr una recuperación más completa del suelo. En conjunto, los resultados muestran que *Urtica dioica* L. puede ser una alternativa sostenible, viable y de bajo costo para recuperar suelos contaminados con plomo en zonas afectadas por pasivos ambientales.

VI. Conclusiones

La caracterización de los suelos del sector Cruz Sayhua permitió concluir que la zona se encuentra severamente afectada por contaminación por plomo, con concentraciones homogéneas entre las muestras evaluadas. Esta situación muestra que la zona presenta un nivel de contaminación significativo, posiblemente relacionado con actividades extractivas o con pasivos ambientales de años anteriores. La uniformidad de los niveles de plomo sugiere una fuente común de contaminación y resalta la urgencia de implementar estrategias de recuperación ambiental, justificando la evaluación de alternativas de fitorremediación como el uso de *Urtica dioica* L.

El cultivo de *Urtica dioica* L. demostró ser altamente eficaz en la reducción de la concentración de plomo en los suelos contaminados. La disminución significativa del metal en todas las muestras indica que la planta posee una capacidad fitorremediadora consistente y predecible, capaz de extraer plomo del suelo de manera progresiva. Este resultado refuerza la importancia de la fitorremediación como una estrategia sostenible y ambientalmente amigable frente a métodos químicos que podrían movilizar los metales hacia fuentes de agua o generar efectos secundarios indeseables.

El análisis de acumulación de plomo en los tejidos de *Urtica dioica* L. evidenció una distribución diferencial, predominando en las hojas, seguido por raíces y tallos. Este patrón indica la presencia de mecanismos combinados de fitoextracción y fitoestabilización, donde el metal es absorbido desde el suelo y parcialmente retenido en los órganos vegetales. La capacidad de acumulación observada en las hojas permite la remoción del contaminante mediante cosechas periódicas, mientras que la retención en raíces contribuye a reducir la movilidad del metal en el suelo. La uniformidad de este comportamiento entre las plantas estudiadas confirma que la especie tiene un rendimiento consistente en su función remediadora.

Aunque la reducción relativa de plomo fue significativa, los niveles finales aún superan los límites establecidos por los Estándares de Calidad Ambiental para Suelo, lo que indica que la fitorremediación con *Urtica dioica* L. debe considerarse como un proceso gradual. Para alcanzar la descontaminación total, es recomendable extender el número de ciclos de cultivo o combinar esta estrategia con otras técnicas complementarias de remediación, optimizando así la recuperación de los suelos con alta carga metálica.

La investigación confirma la viabilidad de *Urtica dioica* L. como alternativa eficiente, económica y ambientalmente sostenible para la recuperación progresiva de suelos contaminados con plomo. Los hallazgos respaldan su aplicación en condiciones de laboratorio y sugieren su potencial extrapolación a escalas mayores, contribuyendo al desarrollo sostenible y a la gestión responsable del medio ambiente en zonas afectadas por contaminación metálica. Asimismo, los resultados enfatizan la necesidad de continuar evaluando especies vegetales con alta capacidad de acumulación de metales pesados y estudiar la interacción de estas especies con diferentes condiciones edáficas y ambientales para optimizar los procesos de fitorremediación.

Finalmente, los resultados obtenidos permiten sentar bases científicas sólidas para futuras investigaciones sobre fitorremediación en el Perú, demostrando que especies locales o adaptadas, como *Urtica dioica* L., pueden desempeñar un papel clave en la mitigación de suelos contaminados y en la promoción de estrategias de recuperación ambiental sostenibles, contribuyendo tanto a la seguridad ambiental como a la salud pública.

VII. Recomendaciones

Se recomienda a las instituciones encargadas de la gestión ambiental, como ministerios y agencias gubernamentales, incluir la fitorremediación con *Urtica dioica L.* en sus planes de recuperación de suelos contaminados. Este enfoque debe ser considerado como una herramienta económica y ecológica para remediar áreas afectadas por la minería, la industria y otras actividades contaminantes.

A los investigadores y especialistas en botánica se les sugiere desarrollar estudios complementarios para optimizar las condiciones de cultivo de la *Urtica dioica L.* También se recomienda a las universidades y centros de investigación replicar los ensayos en diferentes regiones para evaluar el impacto de variables ambientales y garantizar su aplicabilidad en diversos contextos.

Se insta a las autoridades locales y regionales a promover el uso de *Urtica dioica L.* como una solución viable en la rehabilitación de suelos contaminados. Además, se sugiere a los responsables de proyectos ambientales que realicen programas piloto en comunidades afectadas para verificar la eficacia de esta técnica en escenarios reales.

Se recomienda a los encargados de la gestión de residuos peligrosos establecer protocolos adecuados para la disposición segura de las plantas que acumulan metales. Asimismo, los resultados de esta investigación deben compartirse con organismos internacionales para promover la *Urtica dioica L.* como modelo de investigación en fitorremediación a nivel global.

VIII. Referencias

- Abanto, A. (2019). *¿Dónde va nuestra basura?* [Diapositiva]. Informe Defensorial N° 181, Perú. <https://www.defensoria.gob.pe/wp-content/uploads/2019/11/PPT-Informe-Defensorial-181.pdf>
- Abanto, J., Calvo, R., & López, K. (2016). *Problemática de residuos sólidos en Huánuco*. Dirección Ejecutiva de Salud Ambiental. <http://www.ods.org.pe/material-de-consulta/10-botaderos-en-huanuco-diresa/file>
- Badirzadeh, A., Haghdoost, M., Chegeni-Sharafi, A., Mohebbali, M., Akhondi, B., Emdadi, D., & Canavate, C. (2020). Actividad antileishmaniasis del extracto de *Urtica dioica* contra la leishmaniasis cutánea zoonótica. *PLoS Neglected Tropical Diseases*, 14(1), e0007843. <https://doi.org/10.1371/journal.pntd.0007843>
- Camones, V. (2023). *Efecto de la fitorremediación con ortiga (Urtica urens, Urtica dioica y Urtica atrovirens) en la calidad de los suelos contaminados con arsénico debido a actividades mineras en el depósito de relaves de Quiulacocha, distrito de Simón Bolívar, provincia y región de Pasco - 2022*. <http://repositorio.udh.edu.pe/20.500.14257/4814>
- Carhuaricra, P. (2019). *Fitorremediación por el proceso de fitodegradación con dos especies macrófitas acuáticas, Limnobium laevigatum y Eichhornia crassipes para dar tratamiento a las aguas residuales domésticas de la laguna facultativa en la localidad de Pacaypampa, distrito de Santa María del Valle (Huánuco)* [Tesis, Universidad de Huánuco]. <http://localhost:8080/xmlui/handle/123456789/1598>
- Castro, E. (2020). *Efecto del quelato (EDTA) en la fitorremediación de un suelo contaminado por plomo, con Urtica urens en La Oroya, 2018* [Tesis de título profesional, Escuela Académico Profesional de Ingeniería Ambiental, Universidad Continental]. Repositorio Institucional - Universidad Continental. <https://repositorio.continental.edu.pe/handle/continental/123456789>
- Díaz, H. (2018). *Evaluación de la calidad de suelo en un bosque reforestado con eucalipto en la zona de Pacán—Huánuco 2017* [Universidad Nacional Hermilio Valdizán]. <http://repositorio.unheval.edu.pe/handle/UNHEVAL/3550>
- Díaz, M. (2017). *Capacidad de acumulación de la ortiga (Urtica urens) para la fitorremediación de suelos contaminados con plomo en La Oroya, Junín* [Universidad César Vallejo]. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/6866>

- Ecología Verde. (2020). *Horizontes del suelo: estructura y factores*. Recuperado el 31 de julio de 2025, de <https://www.ecologiaverde.com/horizontes-del-suelo-estructura-y-factores-4453.html>
- El Productor. (2020). *Propiedades físicas del suelo* | Noticias Agropecuarias. <https://elproductor.com/2020/01/propiedades-fisicas-del-suelo/>
- Espejo, R. (2016). *La Agricultura de Conservación, herramienta para potenciar el papel del suelo como sumidero de CO2 atmosférico y defender a los suelos agrícolas de la erosión* (1ª ed., Vol. 1). Agricultura de Conservación. http://www.conama.org/conama/download/files/conama2016/STs%202016/1998972102_doc_REspejo.pdf
- FAO. (2019). *Color y manchas de color*. http://www.fao.org/tempref/Fl/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s05.htm
- Flores et al. (2013). La fitorremediación como alternativa sustentable para el tratamiento de suelos contaminados. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 29(2), 91–102. <https://www.scielo.org.mx/pdf/rica/v21n2/0188-4999-rica-21-02-91.pdf>
- González, J. (2023). *Evaluación de la eficiencia bactericida de los extractos vegetales de Salvia Rosmarinus Schleid. (romero) y Urtica urens L. (ortiga negra) en la práctica de desinfección*. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba. <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/22145>
- Guadamos, Y., & Julca, K. (2022). *Análisis de la eficiencia para la remediación con Brassica juncea, Cecropia peltata y Urtica urens en suelos contaminados por minería, de 2010 al 2021* [Tesis de licenciatura, Universidad Privada del Norte]. Repositorio de la Universidad Privada del Norte. <https://hdl.handle.net/11537/31487>
- Hernández R., Fernandez, C., Baptista, M. (2014) *Metodología de la investigación*-McGraw W.Hill Interamericana editores S.S. de CV. Sexta edición. Mexico D.F.
- López, J., & Contreras, E. (2017). *Estudio de factibilidad del uso de la fitorremediación como alternativa para la remoción de metales pesados en el suelo usado como botadero a cielo abierto en Utopía-Yopal* [Universidad de LaSalle]. https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1715&context=ing_ambiental_sanitaria
- MINAM. (2014). *Aprueban Guía para el Muestreo de Suelos*.
- MINAM. (2015). *Guía para la Elaboración de Estudios de Evaluación de Riesgos a la Salud y el Ambiente (ERSA) en Sitios Contaminados*.

- MINAM. (2017). *Decreto Supremo N° 011-2017-MINAM que aprueba los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Suelo*. El Peruano.
- MINAM. (2017). *Decreto Supremo N° 012-2017-MINAM que establece disposiciones para la gestión de sitios impactados ambientalmente*. El Peruano.
- Neugschwandtner, R. W., Tlustoš, P., Komárek, M., & Száková, J. (2008). Phytoextraction of Pb and Cd from a contaminated agricultural soil using different EDTA application regimes: Laboratory versus field-scale measures of efficiency. *Geoderma*, 144(3–4), 446–454. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2007.11.021>
- Ortiz, J., & Rojas, M. (2022). *Análisis comparativo entre Urtica urens, Aloe barbadensis miller y Helianthus annuus al fitorremediar suelos contaminados con metales pesados plomo y cadmio - 2022* [Tesis de licenciatura, Universidad Privada del Norte]. Repositorio de la Universidad Privada del Norte. <https://hdl.handle.net/11537/33174>
- OEFA. (2014). *La Fiscalización Ambiental en Residuos Sólidos*. <https://www.google.com/search?q=relleno+sanitario+significado&rlz>
- Paredes, E. (2021). *Efecto de la fitorremediación con dos variedades de ortiga (Urtica Urens l.) y (Urtica Dioica l.) en la calidad del suelo usado como botadero a cielo abierto, Marabamba, provincia y departamento de Huánuco - 2021*. <http://repositorio.udh.edu.pe/123456789/3187>
- Pomboza-Tamaquiza, P., Quisintuña, L., Dávila-Ponce, M., Llopis, C., & Vásquez, C. (2016). *Hábitats y usos tradicionales de especies de Urtica l. en la cuenca alta del RIO Ambato*. Tungurahua - Ecuador: Journal of The Selva Andina Biosphere.
- Pulford, I., Watson, C., (2003) Phytoremediation of heavy metal-contaminated land by trees a review. *Pubmed Environment International*. Volumen 19 issue 4 July 2003 pages 529-540.
- Queupuan, M. (2017). *Evaluación de fitorremediación de suelos contaminados con plomo mediante el cultivo de Atriplex halimus L.* [Universidad de Chile]. <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/152823>
- Quincho, C., & Saldaña, V. (2023). *Análisis de la fitoextracción con Urtica urens L. en suelos contaminados con plomo, en los últimos 10 años* [Tesis de licenciatura, Universidad Privada del Norte]. Repositorio de la Universidad Privada del 2003Norte. <https://hdl.handle.net/11537/34025>

- Quiroga et al. (2020). *Prospective analysis of phytoremediation species for agricultural soils contaminated with cadmium in Mosquera - Colombia*. Journal of Alternative Perspectives in the Social Sciences, 10(2), 259.
- Rodríguez et al. (2019). *La Contaminación del Suelo una Realidad Oculta* (p. 144). <http://www.fao.org/3/I9183ES/i9183es.pdf>
- Romoleroux et al. (2019). *Urticaurens*. <https://bioweb.bio/floraweb/polylepis/FichaEspecie/Urtica%20urens>
- Rusell, D. (2019). *El suelo: El tesoro que vive bajo nuestros pies*.
- Sedano, S., & Zanabria, A. (2022). *Eficacia fitorremediadora de las especies Urtica urens y Amaranthus hybridus en la remoción de mercurio en suelos del pasivo ambiental minero de Santa Bárbara-Huancavelica-2021*. Universidad Nacional de Huancavelica. <https://hdl.handle.net/20.500.14597/4580>
- Silva, J. (2017). *Capacidad fitorremediadora de Urtica urens L. en suelos con metales pesados del sector Campanario, Quiruvilca, Santiago de Chuco, La Libertad* (Tesis de grado, Universidad César Vallejo). Repositorio institucional de la Universidad César Vallejo
- Supo, J., & Zacarías, H. (2020). *Metodología de la Investigación Científica* (Tercera edición, Vol. 1). Bioestadístico EEDU.
- Tarazona, L. (2018). *Evaluación del efecto de plantaciones de eucalipto (Eucalyptus globulus) y un bosque natural de aliso (Alnus glutinosa) en la calidad del suelo; en zona de Ragraj-San Buenaventura*. [Universidad Nacional Hermilio Valdizán]. <http://repositorio.unheval.edu.pe/bitstream/handle/unheval/4075/pga%2000071t22.pdf?sequence=1&isallowed=y>
- Viktorova, J., Jandova, Z., Madlenakova, M., Prouzova, P., Bartunek, V., Vrchotova, B., Lovecka, P., Musilova, L., & Macek, T. (2016). Native phytoremediation potential of *Urtica dioica* for removal of PCBs and heavy metals can be improved by genetic manipulations using constitutive CaMV 35S promoter. *PLOS ONE*, 11(12), e0167927. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0167927>
- Yacolca, M. (2017). *Capacidad fitorremediadora de la ortiga (Urtica urens) en suelos contaminados con plomo por pasivo ambiental ubicado en la localidad de San Miguel-Cerro de Pasco* [Universidad César Vallejo]. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/29038>
- Zerbino, S., & Altier, N. (2020). *La Biodiversidad del suelo su Importancia para el Funcionamiento de los Ecosistemas*.

Zúñiga, P. (2020). *Fitorremediación de suelo agrícola contaminado con cadmio con la especie *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms, en la cuenca baja del río Guayas* [Universidad de Guayaquil]. <http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/48750>

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