UNIVERSIDAD NACIONAL DE JULIACA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y FORESTAL

CAPACIDAD FITORREMEDIADORA DE STIPA ICHU INCORPORANDO ENMIENDAS EN SUELO CONTAMINADO POR METALES PESADOS DE LA PERIFERIA DE ANANEA, PUNO - PERÚ.

Jhon Bruner Cahuana Huaman

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO AMBIENTAL Y FORESTAL

Asesor: Dr. Wile Mamani Navarro

Juliaca - Perú
2025

UNIVERSIDAD NACIONAL DE JULIACA

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y FORESTAL

CAPACIDAD FITORREMEDIADORA DE STIPA ICHU INCORPORANDO ENMIENDAS EN SUELO CONTAMINADO POR METALES PESADOS DE LA PERIFERIA DE ANANEA, PUNO - PERÚ.

Jhon Bruner Cahuana Huaman

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO AMBIENTAL Y FORESTAL

Asesor: Dr. Wile Mamani Navarro

Juliaca - Perú

2025

FICHA CATALOGRÁFICA

Autor	: Jhon Bruner Cahuana Huaman
Título de la tesis	: Capacidad fitorremediadora de *Stipa ichu* incorporando enmiendas en suelo contaminado por metales pesados de la periferia de Ananea, Puno - Perú
Línea de Investigación	: Desarrollo de tecnología para la mitigación y adaptación al cambio climático.
Facultad	: Facultad de Ciencias de la Ingeniería
Escuela profesional	: Ingeniería Ambiental y Forestal
Publicación	: Juliaca, 2025
Extensión	: 95 páginas (influye tablas, figuras y anexos.)
	Código: 01-000049-01/C11

Citar:

Cahuana J.B. (2024). *Capacidad fitorremediadora de Stipa ichu incorporando enmiendas en suelo contaminado por metales pesados de la periferia de Ananea, Puno - Perú*. [Trabajo de grado]. Universidad Nacional de Juliaca. pp. 129

UNIVERSIDAD NACIONAL DE JULIACA

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENERIA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENEIRIA AMBIENTAL Y FORESTAL

"CAPACIDAD FITORREMEDIADORA DE STIPA ICHU INCORPORANDO ENMIENDAS EN SUELO CONTAMINADO POR METALES PESADOS DE LA PERIFERIA DE ANANEA, PUNO - PERÚ"

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO AMBIENTAL Y FORESTAL

Presentada por:

Bach. Jhon Bruner Cahuana Huaman

Sustentada y aprobada ante el siguiente jurado:

Mg. Cesar Enrique Yupanqui Bendita

PRESIDENTE DE JURADO

M.Sc. Godofredo Huanca Chambi

JURADO (secretario)

M.Sc. Ebed David Paredes Rodríguez

JURADO (Vocal)

Dr. WILE MAMANI NAVARRO

DEDICATORIA

A mis padres Aniceto Cahuana Tintaya y Gladis Huaman Quispe por su amor incondicional y su apoyo en cada paso de mi vida académica y personal; a mi señorita enamorada Mayumi Jimena Centeno Paucar. a mis hermanos Dayu y Stif, por ser mis fuentes constantes de inspiración. A mis maestros y mentores, quienes con su guía y paciencia me han permitido crecer tanto en lo personal como en lo profesional.

Jhon Bruner Cahuana Huaman

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a Dios por darme la fortaleza y la perseverancia para superar cada obstáculo en este camino.

A mi asesor y coasesor, el Dr. Wille Mamani Navarro y el Mg. Edwin Huayhua Huamani, por su invaluable orientación y dedicación. Su experiencia y conocimiento fueron fundamentales para el desarrollo de esta investigación.

También, expreso mi profundo agradecimiento a los miembros del jurado, el Mg. César Enrique Yupanqui Bendita y el M.Sc. Ebed David Paredes Rodríguez, grandes profesionales y personas extraordinarias, por compartirme sus conocimientos durante mi etapa universitaria y por todas sus orientaciones.

A Jimena Centeno Paucar por apoyarme durante la ejecución de mi tesis, Gabriela Yana Huaranca y Sheila Chambi Quispe por darme un su tiempo para poder ejecutar este proyecto.

Jhon Bruner Cahuana Huaman

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTO	vi
ÍNDICE GENERAL	vii
ÍNDICE DE TABLAS	x
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
ÍNDICE DE ANEXOS	xii
ACRÓNIMOS	xiii
RESUMEN	xiv
ABSTRACT	xv
INTRODUCCIÓN	15
CAPÍTULO I	
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	
1.1 Situación problemática	17
1.2 Formulación del problema	18
1.2.1 Problema general	18
1.2.2 Problemas específicos	18
1.1 Objetivos de investigación	18
1.2.3 Objetivo general	18
1.2.4 Objetivos específicos	19
1.2 Justificación	19
CAPÍTULO II	
REVISIÓN DE LITERATURA	
2.1 Antecedentes de investigación	21
2.1.1 Antecedentes internacionales	21
2.1.2 Antecedentes nacionales	23
2.1.3 Antecedentes locales	26
2.2 Bases teóricas	28
2.2.1 Contaminación del suelo por metales pesados	28
2.2.2 Metales pesados en el suelo	29
2.2.3 Enmiendas orgánicas	30
2.2.4 *Stipa Ichu*	30
2.2.5 Taxonomía de la especie	31

2.2.6 Fitorremediación 31
2.2.7 Mecanismo de fitorremediación 32
2.2.8 Factores de absorción 33
2.2.9 Estándar de calidad ambiental 34

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Ámbito de estudio: localización política y geográfica 36
3.2 Tipo y nivel de investigación 36
3.2.1 Tipo o enfoque de la investigación 36
3.2.2 Nivel de investigación 37
3.2.3 Diseño de la investigación 37
3.3 Unidad de análisis 37
3.4 Población de estudio 37
3.5 Tamaño de muestra 37
3.6 Técnicas de recolección de información 37
3.7 Técnicas de recolección de información 39
3.7.1 Material 39
3.7.2 Equipo 39
3.7.3 Reactivos e insumos 39
3.8 Metodología 39
3.8.1 Concentración del Pb, Zn, Cr y Cd en las hojas de la especie *Stipa Ichu* después de los tratamientos. 39
3.8.2 Determinación de la concentración de Pb, Zn, Cr y Cd en las raíces de la especie *Stipa Ichu* después de los tratamientos 41
3.8.3 Determinación del rendimiento de absorción del Pb, Zn, Cr y Cd en los suelos tratados con enmiendas. 43
3.8.4 Cálculo del rendimiento de la fitorremediación 45
3.8.5 Factor de translocación (FT) 45
3.8.6 Rendimiento del tratamiento (RT) 46
3.8.7 Hipótesis de la investigación 46
3.8.1 Operalizacion de variables 47

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Determinación de la concentración de Pb, Zn, Cr y Cd en las hojas de la especie Stipa ichu después de los tratamientos. 48

4.2 Determinación de la concentración de Pb, Zn, Cr y Cd en las raices de la especie Stipa ichu después de los tratamientos. 51

4.3 Determinación del rendimiento de absorción del Pb, Zn, Cr y Cd en los suelos tratados con enmiendas. 54

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones 59

5.2 Recomendaciones 60

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 62

ANEXOS 72

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Taxonomía de la especie Stipa ichu 31
Tabla 2 Cuadro de la composición de las unidades de diseño experimental 35
Tabla 2 Cuadro de la composición de las unidades de diseño experimental 38
Tabla 4 Distribución de las unidades de diseño experimental en tres repeticiones. 41
Tabla 5 Distribución del diseño experimental de los 4 tratamientos. 44
Tabla 5 Variables de experimentación. 47
Tabla 7 Consolidado de los resultados de metal pesado en las hojas. 50
Tabla 8 Consolidado de los resultados de metal pesado en la raíz. 53
Tabla 9 Consolidado de los factores de fitorremediación de metales pesados en la especie Stipa Ichu. 57

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación de los puntos de muestras de suelo en el distrito de Ananea. 36
Figura 2. Metales pesados presentes en las hojas por tratamiento. 51
Figura 3. Metales pesados presentes en la raíz por tratamiento. 54
Figura 4. Metales pesados presentes en la raíz por tratamiento. 58

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Matriz de consistencia 73
Anexo 2. Ficha Estadística de la concentración de Cromo en Hojas de Stipa I..... 74
Anexo 3. Ficha Estadística de la concentración de Cadmio en Hojas de Stipa I. 75
Anexo 4. Ficha Estadística de la concentración de Cromo en Hojas de Stipa I..... 76
Anexo 5. Ficha Estadística de la Concentración de Plomo en Hojas de Stipa I...... 77
Anexo 6. Ficha Estadística de la Concentración de Zinc en Hojas de Stipa I...... 79
Anexo 7. Ficha estadística de la concentración de cromo en raíz de Stipa I. 81
Anexo 7. Ficha estadística de la concentración de plomo en raíz de Stipa I. 83
Anexo 7. Ficha estadística de la concentración de plomo en raíz de Stipa I. 85
Anexo 10. Ficha estadística del rendimiento de cadmio en el suelo. 87
Anexo 11. Ficha estadística del rendimiento de cromo en el suelo...... 89

ACRÓNIMOS

GEI	: Gases de Efecto Invernadero
IPCC	: Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático
MINAM	: Ministerio del Ambiente
UNAJ	: Universidad Nacional de Juliaca

RESUMEN

La contaminación del suelo por metales pesados, especialmente en áreas mineras como Ananea, Puno, representa una seria amenaza ambiental y para la salud pública. Este estudio evaluó la capacidad de la gramínea nativa *Stipa Ichu* para fitorremediar suelos contaminados con plomo (Pb), zinc (Zn), cromo (Cr) y cadmio (Cd), con el objetivo de determinar su potencial como fitoestabilizadora o fitoextractora. Se implementó un diseño experimental con cuatro tratamientos: THC (humus y cuyina), TCC (compost y cuyina), TSE (suelo contaminado sin enmiendas) y MT (suelo limpio como control), analizando las concentraciones de metales en hojas, raíces y suelo después de 90 días. Los resultados mostraron que el tratamiento TCC promovió una mayor acumulación de Cr (5.24 mg/kg) y Zn (28.43 mg/kg) en las hojas de *Stipa Ichu*. Sin embargo, el tratamiento THC evidenció una capacidad limitada para absorber Pb, con una concentración de 0.00 mg/kg en las hojas. En las raíces, el tratamiento TSE presentó las concentraciones más elevadas de Pb (5.37 mg/kg), Cr (4.37 mg/kg) y Zn (53.02 mg/kg). El análisis de los factores de bioconcentración (FBC) y translocación (FT) indicó que *Stipa Ichu* actúa principalmente como fitoestabilizadora para Cd y Pb. No obstante, para Zn, el tratamiento TSE alcanzó un rendimiento del 54% en la reducción de este metal en el suelo, lo que sugiere un mayor potencial de fitoextracción.

Palabras clave: bioacumulación, enmiendas orgánicas, fitorremediación, metales pesados y *Stipa ichu*.

ABSTRACT

Soil contamination by heavy metals, especially in mining areas such as Ananea, Puno, represents a serious environmental and public health threat. This study evaluated the capacity of the native grass *Stipa Ichu* to phytoremediate soils contaminated with lead (Pb), zinc (Zn), chromium (Cr) and cadmium (Cd), with the objective of determining its potential as a phytostabilizer or phytoextractor. An experimental design with four treatments was implemented: THC (humus and guinea pig), TCC (compost and guinea pig), TSE (contaminated soil without amendments) and MT (clean soil as control), analyzing the concentrations of metals in leaves, roots and soil after 90 days. The results showed that the TCC treatment promoted a higher accumulation of Cr (5.24 mg/kg) and Zn (28.43 mg/kg) in *Stipa Ichu* leaves. However, the THC treatment evidenced a limited capacity to absorb Pb, with a concentration of 0.00 mg/kg in leaves. In roots, the TSE treatment presented the highest concentrations of Pb (5.37 mg/kg), Cr (4.37 mg/kg) and Zn (53.02 mg/kg). Analysis of bioconcentration (BCF) and translocation factors (TF) indicated that Òtextit (*Stipa Ichu*) acts mainly as a phytostabilizer for Cd and Pb. However, for Zn, the TSE treatment achieved a 54% yield in the reduction of this metal in the soil, suggesting a higher phytoextraction potential.

Keywords: bioaccumulation, heavy metals, organic amendments, phytoremediation and Stipa ichu.

INTRODUCCIÓN

La contaminación por metales pesados en suelos constituye un desafío ambiental de alcance global, con profundas implicaciones para la salud humana y la integridad de los ecosistemas (Cordero et al., 2022). En este contexto, el Perú, particularmente en regiones como Arequipa, Puno y Apurímac, enfrenta una problemática aguda derivada de su intensa actividad minera. Estas zonas, reconocidas por su producción de metales como el oro, plomo, cobre y otros, estos se ven afectadas por la acumulación de desechos mineros que, consecuentemente, filtran sustancias tóxicas al suelo y a las aguas subterráneas (Cortez, 2019).

El distrito de Ananea, ubicado en la región de Puno, ejemplifica de manera paradigmática esta situación (Cuentas & Velarde, 2019). En esta zona, las operaciones mineras artesanales, pequeñas e ilegales han generado niveles alarmantes de contaminación del suelo, principalmente por metales pesados como mercurio y plomo. Frente a esta realidad, surge la

imperativa necesidad de implementar soluciones efectivas y sostenibles (Canaza et al., 2022).

En respuesta a esta problemática, la fitorremediación se presenta como una tecnología prometedora, eco-amigable y de bajo costo para la descontaminación de suelos (Novoa, Arizaca, & Huisa, 2022). En este sentido, el presente estudio se enfoca en evaluar la eficacia de la especie Stipa Ichu, una planta nativa de los Andes, en la absorción y acumulación de metales pesados como plomo (Pb), zinc (Zn), cromo (Cr) y cadmio (Cd) en los suelos contaminados de Ananea (Menéndez & Muñoz, 2021). Asimismo, la investigación explora el potencial de esta especie para la fitorremediación, incorporando diferentes enmiendas orgánicas como humus y compost con el fin de optimizar su rendimiento (Anticona & Huamán, 2023).

El objetivo principal de este trabajo, es determinar la capacidad de Stipa Ichu para acumular metales pesados en sus tejidos, tanto en hojas como en raíces. Paralelamente, se busca evaluar la eficiencia de diferentes tratamientos del suelo en la mejora de este proceso (Fernandez, Mullisaca & Huanchi, 2022). Para ello, se ha diseñado un riguroso experimento acompañado de análisis estadísticos detallados, que no solo permitirán cuantificar la absorción de metales por la planta, sino también comprender los mecanismos de translocación y bioconcentración involucrados (Canales et al., 2022).

Los resultados de esta investigación tienen el potencial de contribuir significativamente al desarrollo de estrategias de remediación ambiental en zonas mineras contaminadas, ofreciendo así una alternativa sostenible y adaptada a las condiciones locales de los Andes peruanos (Prieto & Fernadez, 2020). Además, este estudio podría proporcionar información valiosa sobre el uso de especies nativas en procesos de fitorremediación, un campo de creciente interés en la gestión ambiental y la recuperación de ecosistemas degradados (Cortez, 2019).

Esta investigación no solo aborda un problema ambiental crítico, sino que también explora soluciones innovadoras y sostenibles (Kana et al., 2021). De este modo, se espera que los hallazgos obtenidos sirvan como base para futuras investigaciones y, en última instancia, contribuyan a la implementación de prácticas más efectivas en la recuperación de suelos contaminados por actividades mineras en la región andina y más allá (Liu et al., 2023).

CAPÍTULO I
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Situación problemática

A nivel Mundial, la acumulación de relaves mineros representa un riesgo ambiental y sanitaria por la presencia de elementos toxico con diferentes concentraciones que superan los límites normados por la legislación de diferentes países (Cordero et al., 2022). Los impactos ambientales de los relaves mineros son la contaminación del suelo, agua superficial y subterránea; las sustancias tóxicas son transportados hasta los cuerpos hídricos (Samareño et al., 2020). Los metales pesados causan daños considerables al cuerpo humano y a los ecosistemas; en los seres humanos se acumulan en órganos como el sistema nervioso, los riñones y el hígado; en el caso de la biosfera se transporta por medio de la cadena alimenticia (Kama et al., 2021).

A nivel Nacional, en las regiones del Perú como Arequipa, Puno y Apurímac se producen metales como el oro, plata y cobre, el principal problema es la acumulación de desechos mineros que filtran sustancias toxicas al suelo y al agua subterránea causando contaminación ambiental y afectando la salud de las poblaciones aledañas (Arce, 2023). La contaminación causada por el sector minera afecta principalmente a las cabeceras de las cuencas hidrográficas, los impactó ambientales negativos se presentan en el recurso hídrico y agrícola, los contaminantes que se identificaron fueron principalmente metales pesados (Huaranga et al., 2022). La generación de residuos mineros se incrementa cada año y sin un adecuado tratamiento se convierten en pasivos ambientales, hasta el 2019 se identificaron 2700 pasivos de alto riesgo y se necesita 7 mil millones de soles para su remediación, la minería ilegal ha contribuido en el aumento de pasivos ambientales y suelos contaminados, a su vez; los problemas socio-ambientales (Mora, 2019).

A nivel local, en la región de Puno específicamente en el distrito de Ananea, el problema principal es la contaminación del suelo por relave mineros; generado por las mineras artesanales, pequeñas e ilegales (Velarde & Cuentas, 2019). La producción de oro de la minería aurífera artesanal genera desechos y estos son vertidos a los suelos contaminando este componente ambiental, uno de los contaminantes identificados fue el mercurio que sobrepasan los ECA´s de la norma peruana (Loza & Canccapa, 2020). También se identificó el plomo; estos metales son tóxicos para los seres humanos y la biosfera de la zona, representando un riesgo para la salud pública y el medio ambiente (Canales et al., 2022).

El ámbito de estudio se centró en los suelos contaminados del centro urbano de Ananea, afectados por la actividad minera local, especialmente por el vertimiento de lixiviados provenientes de los relaves mineros generados durante la extracción y procesamiento de vetas de oro, que involucraron el uso de sustancias químicas tóxicas (Menéndez & Muñoz, 2021). Esta contaminación alteró las características físico-químicas del suelo, lo que incluyó la presencia de metales pesados como mercurio, plomo, arsénico y cadmio, afectando su estructura, reduciendo su fertilidad, disminuyendo su capacidad de retención de agua y alterando su biodiversidad microbiana (Fernández et al., 2022). Además, estos cambios en el suelo incrementaron su toxicidad y alteraron los ciclos biogeoquímicos esenciales, lo que resultó en una disminución de su capacidad para sustentar vida vegetal y agrícola, contribuyendo también a la contaminación de cuerpos de agua cercanos y ecosistemas adyacentes (Cuentas & Velarde, 2019). En vista de estos impactos, la fitorremediación se propuso como una tecnología sostenible, de bajo costo y eco-amigable, orientada a reducir la concentración de metales pesados en el suelo y recuperar su funcionalidad ambiental (Ramírez & Contreras, 2022).

1.2 Formulación del problema

1.2.1 Problema general

¿Cuál es la capacidad fitorremediadora del *Stipa Ichu* incorporando enmiendas en suelos contaminados por metales pesados de la periferia de Ananea, Puno - 2023?

1.2.2 Problemas específicos

¿Cuál es la concentración de Pb, Zn, Cr y Cd en las hojas de la especie *Stipa Ichu* después del tratamiento?

¿Cuál es la concentración de Pb, Zn, Cr y Cd en la raíz de la especie *Stipa Ichu* después del tratamiento?

¿Cuál es el rendimiento de adsorción de Pb, Zn, Cr y Cd en los suelos tratados con enmiendas?

1.1 Objetivos de investigación

1.2.3 Objetivo general

Evaluar la capacidad fitorremediadora del *Stipa Ichu* incorporando enmiendas en suelo contaminado por metales pesados de la periferia de Ananea, Puno - Perú

1.2.4 Objetivos específicos

Determinar la concentración de Pb, Zn, Cr y Cd en las hojas de la especie *Stipa Ichu* después de los tratamientos.

Determinar la concentración de Pb, Zn, Cr y Cd en las raíces de la especie *Stipa Ichu* después de los tratamientos.

Determinar el rendimiento de absorción del Pb, Zn, Cr y Cd en los suelos tratados con enmiendas.

1.2 Justificación

La fitorremediación es una solución ecológica y sostenible para la rehabilitación de suelos degradados por la actividad minera, particularmente en zonas de alto andinas o altiplánicas como Ananea (Munive et al., 2020). Esta técnica se basa en la capacidad natural de las plantas para adsorber, acumular, estabilizar o degradar contaminantes, lo cual representa una alternativa eficaz frente a los métodos convencionales de remediación que, al involucrar la remoción de grandes volúmenes de suelo contaminado y alteraciones significativas de los ecosistemas (Castillo et al., 2021). El uso de *Stipa ichu*, una especie autóctona adaptada a las condiciones edáficas y climáticas de los Andes, no solo favorece la regeneración de la biodiversidad local, sino que también promueve la restauración de los servicios ecosistémicos vitales, como la estabilización del suelo, la mejora de la calidad y reduce la erosión (Sarmiento & Febres, 2021). Así, la fitorremediación se configura como un enfoque integral para mitigar la contaminación de los suelos y restaurar el equilibrio ecológico en áreas afectadas por la minería.

La contaminación por metales pesados, tales como plomo y cadmio, constituye una amenaza significativa para la salud de las comunidades ubicadas en las proximidades de zonas mineras, como es el caso de Ananea, donde la minería informal y no regulada ha exacerbado la exposición a estos contaminantes (Sotomayor, 2015). La ingestión o absorción de estos metales a través del suelo y el agua puede generar efectos adversos para la salud humana, como enfermedades crónicas, daños al sistema nervioso y cognitivo, y comprometer el bienestar general de las poblaciones locales (Fernandez Ochoa et al., 2022). En este contexto, la fitorremediación representa una estrategia efectiva para reducir la concentración de metales pesados en los medios abióticos, promoviendo un entorno más saludable y seguro para los habitantes (Rodriguez, McLaughlin & Pennock, 2019). Además, la participación activa de las comunidades en el proceso de monitoreo e implementación de la

fitorremediación fortalece la cohesión social, eleva la conciencia ambiental y contribuye al empoderamiento de los habitantes, mejorando su calidad de vida y bienestar colectivo.

La fitorremediación se presenta como una alternativa económica para las cooperativas frente a las tecnologías tradicionales de remediación de suelos contaminados, que requieren altas inversiones y costos operativos elevados (Delgadillo et al., 2011). A diferencia de métodos convencionales, la fitorremediación es un proceso de bajo costo que utiliza recursos naturales y requiere infraestructura mínima, lo que favorece su viabilidad económica (Farraji et al., 2016). El uso de especies vegetales nativas como *Stipa ichu* optimiza la técnica al adaptarse a las condiciones locales, reduciendo costos de mantenimiento (Vargas, 2020). Además, la incorporación de enmiendas orgánicas, como compost y biochar, mejora la capacidad del suelo para retener nutrientes y facilita la absorción de metales pesados, incrementando la eficacia de la fitorremediación (Perales et al., 2020). Esta combinación no solo mejora la descontaminación del suelo, sino que también promueve el desarrollo económico local como la producción y venta de enmiendas y la creación de empleo, fortaleciendo la sostenibilidad social y económica de la estrategia. (Arce, 2020).

La fitorremediación constituye una tecnología innovadora, impulsada por avances en biotecnología y ecología, que ofrece soluciones eficaces para la remediación de suelos contaminados con metales pesados para alturas mayor a 4500 m.s.n.m. (Fahimeh et al., 2021). En particular, el estudio de *Stipa ichu* como agente fitorremediador abre nuevas líneas de investigación para optimizar la capacidad de absorción y acumulación de metales pesados de esta especie para las condiciones extremas de los Andes (Reyes et al., 2019). La investigación sobre su interacción con el microbiota del suelo, integración en sistemas agroforestales y su capacidad para tolerar concentraciones elevadas de metales pesados puede proporcionar información valiosa sobre los mecanismos de fitorremediación y su potencial para ser aplicada en diversos contextos (Fahimeh et al., 2021). Asimismo, la integración de enmiendas orgánicas en el proceso de fitorremediación asistida ha demostrado un gran potencial para aumentar la eficiencia de la absorción de contaminantes y mejorar la regeneración del suelo (Fahimeh et al., 2021).

CAPÍTULO II
REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Antecedentes de investigación

2.1.1 Antecedentes internacionales

Hosseinniaee et al. (2024), en su estudio titulado “Role of compost in assisted phytostabilization via three naturally occurring species on mine-contaminated soil and health risk alleviation for livestock”, evaluaron la eficacia del compost de residuos sólidos urbanos (MSWC) en la fitoestabilización de suelos contaminados al inicio con Pb (472 mg/kg) y Cd (6.85 mg/kg). El objetivo fue analizar cómo el MSWC donde fomenta el crecimiento vegetal y reduce los riesgos para la salud del ganado expuesto a metales pesados. Para ello, diseñaron un experimento con suelos recolectados de la mina Angouran, a los cuales aplicaron cuatro niveles de MSWC (0, 1, 3 y 5% p/p) y cultivaron tres especies vegetales (*Verbascum speciosum*, *Marrubium cuneatum* y *Stipa arabica*). Como resultado, el 5% de MSWC incrementó la materia orgánica del suelo en 38.59%, 50% y 25.21% en cada especie, respectivamente, y redujo la concentración de Cd y Pb disponible en el suelo, lo cual disminuyó su acumulación en las plantas; en la especie *S. arabica*, el factor de bioconcentración (BCF) de Cd pasó de 5.94 a 1.28 y el de Pb de 0.37 a 0.17. Además, el MSWC mitigó los riesgos para la salud animal al reducir la acumulación de Pb en el riñón de vacas en un 65% y la ingesta diaria de Cd en un 30.28%, evidenciando su potencial como una herramienta sostenible de remediación ambiental.

Según Lan Chi et al. (2023), realizaron un estudio titulado "Efecto de Pseudomonas aeruginosa en la fitorremediación de suelos contaminados con metales utilizando *Jatropha gossypifolia*" con el objetivo de evaluar la eficiencia de *Jatropha gossypifolia* asistida por *Pseudomonas aeruginosa* en la remediación de suelos agrícolas cercanos a una mina de bauxita en Tamil Nadu, India. La metodología incluyó la recolección y análisis inicial de suelos agrícolas contaminados cerca de una mina de bauxita, donde se determinaron concentraciones iniciales de metales: Al (13.25 ± 0.54 mg/kg), Pb (336.18 ± 7.17 mg/kg), Zn (382.18 ± 3.05 mg/kg) y Cd (11.32 ± 0.28 mg/kg). Se

diseñaron dos grupos experimentales principales: semillas de *J. gossypifolia* encapsuladas con *P. aeruginosa* y semillas sin encapsular como control. La encapsulación se logró mediante la aplicación de un recubrimiento bacteriano diseñado para optimizar la interacción entre la planta y el microorganismo. Durante el experimento, se realizaron riegos controlados y mediciones periódicas de los niveles de metales en el suelo. Las muestras fueron analizadas utilizando espectrometría de absorción atómica para evaluar la eficiencia de la remediación. Al final del experimento, se observó una reducción significativa en las concentraciones de Al (42.79%), Pb (36.57%), Zn (47.06%) y Cd (39.57%) en los suelos tratados con semillas encapsuladas, destacando la influencia positiva de *P. aeruginosa* en el crecimiento y la capacidad de remediación de *J. gossypifolia*. Este enfoque metodológico evidencia la integración de tecnologías biológicas para abordar problemas de contaminación ambiental.

El estudio de Lan Chi et al. (2023), titulado "Bioacumulación de metales pesados en pastos irrigados con aguas residuales y su transferencia a rumiantes: implicaciones para la salud pública", tuvo como objetivo evaluar las concentraciones de cobre (Cu) y zinc (Zn) en agua, suelo, forrajes, leche y pelo de búfalos, así como su transferencia desde el continuo agua-suelo-forraje a los rumiantes y los riesgos asociados. Se recolectaron muestras en Tehsil Bhalwal, Punjab, Pakistán, y se analizaron con espectrofotometría. Los resultados mostraron que las concentraciones de Cu en el suelo variaron entre 5.940 y 14.900 mg/kg, mientras que en las hojas de los forrajes fluctuaron entre 2.300 y 8.990 mg/kg, con un factor de bioconcentración (BCF) de Cu entre 0.263 y 0.723, lo que indica una significativa acumulación de metales en los forrajes.

El estudio de Zhang et al. (2023), evaluó el impacto del biocarbón (BC) y el ácido fúlvico (FA) en la fitorremediación de sedimentos contaminados con metales pesados usando ryegrass (*Lolium perenne*). Se realizaron experimentos de incubación durante 30 días con cuatro grupos: control, BC, FA y BC+FA. Se analizaron las concentraciones de cadmio (Cd), zinc (Zn) y plomo (Pb) en los sedimentos y en los tejidos vegetales utilizando espectrometría de masas con plasma. Los resultados mostraron que el

tratamiento combinado BC+FA aumentó las concentraciones de Cd y Zn en las raíces y tallos, con incrementos de 50.7% (4.15 mg/kg) para Cd y 143.6% (2.54 mg/kg) para Zn en las raíces, y 70.2% (7.72 mg/kg) para Cd y 29.9% (2.04 mg/kg) para Zn en los tallos. En cambio, las concentraciones de Pb disminuyeron un 59.9% (1.56 mg/kg) en las raíces y un 62.1% (1.12 mg/kg) en los tallos. Además, el factor de bioacumulación (BCF) para Cd aumentó significativamente en el tratamiento BC+FA, mientras que el BCF para Pb disminuyó en todos los tratamientos, lo que sugiere una mejora en la eficiencia de la fitorremediación.

2.1.2 Antecedentes nacionales

Guzmán et al. (2024), en su investigación "Phytoremediation of heavy metals in mining liabilities by *stipa ichu* and *cortaderia nitida*: a laboratory assessment" donde el objetivo fue evaluar la eficiencia de *Stipa ichu* y *Cortaderia nitida* en la fitoremediación de suelos contaminados con metales pesados, El propósito de esta investigación fue analizar la capacidad de las plantas nativas *Stipa Ichu* y *Cortaderia Nitida* para reducir metales pesados en pasivos mineros. El estudio se realizó en un laboratorio en la Universidad Pontificie la Católica de Lima, donde las plantas fueron expuestas a suelos contaminados con metales pesados y se evaluaron las concentraciones en las raíces y en las partes aéreas. Los resultados indicaron que *Stipa Ichu* destacó por su eficiencia en la recuperación de hierro (Fe), alcanzando una concentración final 278 veces superior a la inicial, además de ser efectiva en la remoción de zinc (Zn), cobre (Cu) y cadmio (Cd), con incrementos de 64, 39 y 12 veces en comparación con las concentraciones iniciales, respectivamente. En términos del factor de translocación, *Stipa Ichu* mostró una mayor capacidad de acumulación para Fe, Cu, Zn, Pb y Cr. Estos hallazgos sugieren que *S. ichu* es adecuada para la fitorremediación de pasivos mineros, con un alto potencial para la recuperación de terrenos contaminados.

En la investigación de Gonzales, J. (2024), con título "Fitorremediación de metales pesados en pasivos ambientales mineros del distrito de Hualgayoc, Cajamarca, Perú", cuyo objetivo fue evaluar el potencial de bioacumulación de metales pesados en las especies *Stipa mucronata* y *Festuca dolichophylla*

en áreas afectadas por pasivos ambientales mineros en el distrito de Hualgayoc. La metodología consistió en la recolección de muestras de tejido vegetal en tres estaciones de muestreo (PT-01, PT-02 y PT-04) y en el análisis de las concentraciones de metales pesados (cadmio, cromo, plomo y zinc) mediante espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS). Los resultados mostraron que, en el suelo, las concentraciones más altas fueron de plomo (27 mg/kg en PT-02), mientras en las plantas, *Stipa mucronata* presentó plomo (7.5 mg/kg en PT-01), cromo (3.8 mg/kg), cadmio (0.2 mg/kg) y zinc (31 mg/kg), y *Festuca dolichophylla* presentó plomo (27 mg/kg en PT-02), cromo (3 mg/kg), cadmio (0.1 mg/kg) y zinc (19 mg/kg). Estas concentraciones superaron los límites establecidos por la Unión Europea para la alimentación animal, lo que sugiere un riesgo para la fauna local. En conclusión, las especies estudiadas muestran una alta capacidad para acumular metales pesados, lo que las convierte en candidatas potenciales para la fitorremediación de suelos contaminados.

El estudio de Anticona y Huamán (2023), En su trabajo “Fitorremediación del suelo en el sector chorobal del distrito de Salaverry - Trujillo”, tuvo como objetivo determinar la efectividad de esta técnica para reducir la contaminación por metales pesados en suelos afectados por carbón. Inicialmente, se identificaron concentraciones de Cromo (49 mg/kg), Cadmio (17 mg/kg) y Plomo (119 mg/kg), valores que superaban los Estándares de Calidad Ambiental (ECA). Para la fitorremediación ex situ, se seleccionaron cuatro especies vegetales: Diente de León, Verdolaga, Maíz y Acacia, y tras un periodo de 90 días, se observó que *Portulaca sp.* (Verdolaga) fue la especie más efectiva, logrando una germinación del 75% y reduciendo las concentraciones de metales pesados a 88.8 mg/kg (Pb), 64.32 mg/kg (Ar), 31.65 mg/kg (Cr) y 8.21 mg/kg (Cd), con porcentajes de reducción de 74.6% (Pb), 72.3% (Ar), 64.6% (Cr) y 48.3% (Cd). Estos resultados permiten concluir que la Portulaca sp. es una especie altamente eficaz para la fitorremediación de suelos contaminados por carbón.

El estudio realizado por Castro y Soto (2023), con el título "Determinación del factor de traslocación y bioconcentración de metales pesados en la planta *Stipa ichu* en el pam Quiulacocha - Pasco". tuvo como objetivo determinar

los factores de traslocación (FT) y bioconcentración (FBC) de metales pesados en la planta *Stipa ichu* en suelos del Pasivo Ambiental Minero (PAM) de Quiulacocha, Pasco. Se utilizó una metodología mixta con un diseño no experimental, transversal y descriptivo, y un muestreo no probabilístico de selección experta para las muestras de suelo y planta. Los análisis revelaron que las concentraciones promedio de metales pesados en el suelo fueron: Zn (2076.93 mg/kg), Pb (1474.84 mg/kg), As (749.99 mg/kg), Cu (256.61 mg/kg) y Cd (22.91 mg/kg). En la planta *Stipa ichu*, las concentraciones promedio en la raíz fueron: Zn (748.9 mg/kg), Pb (219.2 mg/kg) y Cd (6.4 mg/kg); mientras que en la parte aérea se encontraron: Zn (86.6 mg/kg), Pb (20.7 mg/kg) y Cd (0.6 mg/kg). En cuanto a los factores de fitorremediación, se obtuvieron los siguientes valores promedio: para el Cd, FT = 0.14, FBC raíz = 0.21 y FBC aérea = 0.02; para Pb, FT = 0.12, FBC raíz = 0.18 y FBC aérea = 0.02; y para Zn, FT = 0.13, FBC raíz = 0.27 y FBC aérea = 0.03. En conclusión, *Stipa ichu* se comporta como fitoestabilizadora para As, Cd, Pb y Zn, pero actúa como fitoacumuladora de Cu en la raíz debido a su FBC > 1.

Prieto Mostacero y Fernández Lamberto (2020), en su estudio titulado "Capacidad Fitorremediadora de plantas metalofitas (*Fuertesimalva echinata, Urtica urens* y *Stipa ichu*) en suelos contaminados por Pb, Cu y Zn", tuvieron como objetivo revisar la capacidad fitorremediadora de estas plantas en suelos contaminados con plomo (Pb), cobre (Cu) y zinc (Zn). La metodología consistió en una revisión de la literatura científica y la recolección de muestras mediante un muestreo probabilístico intencionado realizado en la Laguna de Yanamate, provincia de Pasco, donde se tomaron tres muestras de *Stipa ichu*. Los análisis químicos realizados en las hojas de la planta evidenciaron concentraciones de zinc (131 mg/kg), plomo (0.12 mg/kg) y cobre (2.99 mg/kg), con factores de eficiencia de fitorremediación de 0.62 para zinc y 0.05 para cobre, mientras que para el plomo no se reportaron porcentajes debido a su baja acumulación. Estos resultados destacan el potencial de *Stipa ichu* como una especie metalofita para la remediación de suelos contaminados, especialmente en el caso del zinc.

2.1.3 Antecedentes locales

El equipo conformado por Arce, Calderón y Jarecca (2024); en su estudio Optimización del proceso de Fitoremediación con *Festuca Dolichophylla* y tiosulafto de amonio para mejorar la eficacia de la absorción del mercurio de suelos contaminados con mercurio por la minería del distrito de Ananea Puno-Perú. tuvo como objetivo principal evaluar la eficacia de la fitorremediación con *Festuca dolichophylla* y tiosulafto de amonio para la reducción del mercurio en suelos contaminados por la minería. Metodológicamente, se implementó un diseño experimental en campo, utilizando la especie *Festuca dolichophylla* como agente fitorremediador. Los resultados revelaron que los suelos analizados presentaban un pH neutro y una concentración de mercurio elemental de 56% del total, lo que excedía casi el doble el límite máximo permisible en suelos. Si bien *Festuca dolichophylla* no se catalogó como una planta hiperacumuladora, con un factor de bioacumulación (BAF) de 0.38 en sus hojas, se observó una disminución significativa del contenido de mercurio total (HgT) en el suelo de 43.67 mg/kg, alcanzando una eficacia de remoción del 82%. Este estudio subraya la efectividad de la fitorremediación para la descontaminación de suelos afectados por mercurio y el potencial de *Festuca dolichophylla* como herramienta para la remediación ambiental.

Rios Murga y Lucana Ccallo (2023), en su estudio "Remoción del plomo en suelos contaminados mediante biochar a partir de excretas vacuno y ovino con adición de lombriz roja californiana, en condiciones altiplánicas", evaluaron la capacidad del biochar para remover plomo (Pb) en suelos contaminados de la región de Puno, Perú, donde la actividad minera ha intensificado la contaminación por metales pesados. Con el objetivo de determinar la efectividad del biochar en la remoción de Pb, se empleó una metodología experimental en la que biochar elaborado a partir de excretas de vacuno y ovino fue aplicado a suelos contaminados (719.67 mg/kg de Pb inicial) en tres concentraciones (10%, 20% y 30%), combinando algunos tratamientos con lombrices rojas californianas. Se monitorearon las concentraciones de Pb en el suelo a los 20, 40 y 60 días, observándose que el biochar de excretas de vacuno logró una remoción máxima de 519 mg/kg

(72% de efectividad), mientras que el biochar de excretas de ovino con lombrices alcanzó una remoción de 501 mg/kg (70% de efectividad).

El estudio de Mamani Larico (2023), titulado "Factor de Bioacumulación y Traslocación de Cadmio en *Lupinus mutabilis* y *Vicia faba* en Área Contaminada del Sector Pallcapampa, Distrito de Huancané", tuvo como objetivo determinar el factor de bioacumulación y traslocación de cadmio en *Lupinus mutabilis* y *Vicia faba* en áreas contaminadas. La metodología empleada fue un muestreo no probabilístico con tres tratamientos (T1, T2, T3) con concentraciones de 2.5, 5.0 y 10.0 Cd mg/kg suelo, respectivamente, y un grupo control (T0). Los ensayos se realizaron en un ambiente controlado dentro de un invernadero. Para la determinación de metales se utilizó el método 7003 EPA 200.7 determinación de metales y elementos traza en suelos y sedimentos por ICP - OES. Los coeficientes biológicos se calcularon mediante el método 5090 determination of trace elements in food by inductively coupled plasma - mass spectrometry. El análisis estadístico se basó en un diseño completamente al azar con arreglo factorial de dos por cuatro. Los resultados mostraron una concentración promedio de cadmio en el suelo de 0.514 mg/kg.

Según Narvaez Ttito (2023). En su investigación Especies vegetales altoandinas con potencial fitorremedidor para suelos contaminados por metales pesados del pasivo ambiental minero de Palca, Puno evaluó el potencial fitorremedidor de 23 especies vegetales altoandinas en suelos contaminados por metales pesados del pasivo ambiental minero de Palca, Lampa. Utilizando el método ICP/OES, se identificaron especies con capacidad de acumulación significativa, como *Calamagrostis rigescens*, que acumuló hierro (120 mg/kg), aluminio (90.3 mg/kg) y zinc (8.0 mg/kg); y *Disticha muscoides*, que concentró magnesio (100 mg/kg) y cobre (1.7 mg/kg). Asimismo, *Festuca rigescens* retuvo cromo (0.9 mg/kg) y arsénico (0.3 mg/kg), mientras que *Stipa hans meyeri* acumuló cadmio (0.5 mg/kg) y aluminio (53.7 mg/kg). Además, los factores de bioconcentración y translocación indicaron que especies como *Stipa hans meyeri* y *Calamagrostis* recta son eficaces para la fitoestabilización de elementos como Se, Ag, Al y Mo, mientras que *Festuca rigescens* y *Calamagrostis rigescens*

mostraron capacidad para estabilizar Ti y Cd, demostrando su potencial en la rehabilitación de suelos contaminados en zonas altoandinas.

Según Arce (2022). En su estudio Eficacia de fitorremediación del *Stipa ichu* y la *Festuca dolichophylla* usando tiosulfato de amonio y ioduro de potasio de los suelos contaminados con mercurio por las actividades mineras del distrito de Ananea Puno – Perú, se investigó la eficacia de la fitorremediación utilizando *Festuca dolichophylla J.Presl* y *Stipa ichu*, asistidas con tiosulfato de amonio e ioduro de potasio, para reducir la contaminación por mercurio en suelos. Los resultados mostraron que *F. dolichophylla* tenía un factor de acumulación (BAF) de 0,28 con tiosulfato de amonio y 0,2 con ioduro de potasio, mientras el *S. ichu* presentó un BAF de 0.22 y 0.17 respectivamente. Se concluyó que ambas especies son eficaces en la acumulación de mercurio, con una eficacia del 82% para *F. dolichophylla* y del 73% para *Stipa ichu*.

2.2 Bases teóricas

2.2.1 Contaminación del suelo por metales pesados

La contaminación del suelo por metales pesados debido a la minería constituye un problema ambiental persistente que impacta tanto la salud de los ecosistemas como la humana. En este contexto, la contamina los suelos provoca la acumulación de elementos como Cu, Fe, As, Cd, Pb y Zn. Este fenómeno está determinado por diversos factores, entre los que destacan la composición geoquímica del sitio, las prácticas mineras empleadas y las condiciones ambientales específicas (Martínez et al., 2017). Asimismo, la movilidad y biodisponibilidad de estos metales dependen de propiedades fisicoquímicas del suelo, como el pH, la materia orgánica y la capacidad de intercambio catiónico. Por el contrario, la presencia de materia orgánica puede inmovilizar estos metales mediante procesos de complejación y adsorción, reduciendo así su biodisponibilidad (Pérez-Martínez & Martín Romero, 2015). En consecuencia, la evaluación de los riesgos asociados a los metales pesados en el suelo requiere considerar estas variables fisicoquímicas, así como establecer niveles máximos permisibles alineados con estándares internacionales. Esto resulta fundamental para garantizar la

sostenibilidad ambiental y proteger la salud humana (Mendoza-Escalona et al., 2021).

2.2.2 Metales pesados en el suelo

El plomo es un metal pesado que se acumula fácilmente en los suelos debido a actividades humanas como la minería, la industria y el uso de pinturas. Este metal provoca alteraciones en la estructura del suelo y afecta la biodisponibilidad de nutrientes esenciales, lo que deteriora la calidad del suelo (Wu et al., 2024). Además, el plomo puede ingresar a la cadena alimentaria a través de las plantas, afectando la flora y fauna locales. La contaminación por plomo también altera las propiedades físicas del suelo, reduciendo su capacidad de retención de agua y su fertilidad (Zou et al., 2024).

El zinc es un nutriente esencial para las plantas, su exceso en el suelo puede causar contaminación y alterar el equilibrio ecológico (Dold, 2008). La acumulación de zinc en el suelo reduce la diversidad microbiana y afecta la actividad biológica, lo que impacta negativamente la estructura y fertilidad del suelo (Heredia, 2021). En suelos contaminados con zinc, se observa una reducción en la absorción de otros nutrientes esenciales por las plantas, lo que puede llevar a una disminución en el rendimiento agrícola (Luna & Albújar, 2021).

El cromo, especialmente en su forma hexavalente (Cr(VI)), es altamente tóxico para los suelos. La contaminación por cromo puede alterar la química del suelo, afectando su capacidad de retención de nutrientes y su estructura física (Juarez Valverde, 2020). En suelos contaminados con cromo, se puede observar una disminución de la biodiversidad y una reducción en la actividad microbiana, lo que perjudica la fertilidad del suelo (Posada & Cumana, 2023). Además, la presencia de cromo en suelos agrícolas puede ingresar a la cadena alimentaria, representando un riesgo para la salud humana (Ojeda Castro, 2023).

El cadmio es un contaminante común en suelos debido a la contaminación industrial, la deposición atmosférica y el uso de fertilizantes. Este metal pesado altera la estructura del suelo y su capacidad de retener agua, lo que

puede aumentar la erosión del suelo y disminuir su fertilidad (Uriña, 2022). Además, el cadmio afecta negativamente la vida microbiana del suelo, reduciendo su biodiversidad y alterando la disponibilidad de nutrientes para las plantas (Chambi Castro, 2024). La exposición prolongada al cadmio en suelos también aumenta la toxicidad de estos ecosistemas, lo que pone en peligro tanto la salud de las plantas como la de los animales que dependen de ellos (Valarezo et al., 2022).

2.2.3 Enmiendas orgánicas

Las enmiendas mejoran la estructura y fertilidad del suelo, por lo que incrementan los nutrientes, reducen los gases de efecto invernadero y la erosión. Debido a que retienen agua y nutrientes, las enmiendas recuperan los suelos degradados. De esta manera, se logra una mayor productividad agrícola y captura de carbono de forma sostenible (Murillo et al., 2019).

El compost es el resultado de la descomposición aeróbica controlada de residuos orgánicos por microorganismos. Al aplicarlo al suelo, el compost proporciona nutrientes, mejora la estructura y aporta microorganismos beneficiosos. Debido a estos efectos positivos, el compost permite un desarrollo óptimo de los cultivos y mejora la calidad del suelo de manera sostenible (Pérez et al., 2022). Las principales ventajas de uso de este abono son: mejora la cantidad de materia orgánica, mejora la estructura del suelo, incrementa retención de agua, favorece el desarrollo de la actividad microbiana (Pérez et al., 2022).

El humus es un tipo de enmienda producido por la acción de las lombrices sobre residuos orgánicos; las lombrices generan un abono rico en nutrientes y microorganismos beneficiosos (Pérez et al., 2022). Asu vez, mejora la estructura del suelo, aumenta la aireación y reduce la compactación. Por estos efectos positivos, el vermicompost es ampliamente utilizado en agricultura ecológica para un crecimiento óptimo de los cultivos (Lagos et al., 2022).

2.2.4 *Stipa Ichu*

La especie Stipa Ichu pertenece al género Gramíneas, se extiende desde el país de México hasta la Argentina, en el Perú se presenta principalmente en las zonas altoandinas y altiplánicas (Bechá et al., 2016). Por lo tanto, esta

especie es perenne, crecen hasta 80 cm de altura, son puntiagudas y duras; también, cuenta con hojas foliares de 10 a 33 cm con un haz espero y envés sin pelos; a su vez; contiene espiguillas con pedicelo cortos, glumas de 6-8 mm de longitud (Reynel, 2012). Por otro lado, son fuentes de alimentación para los camélidos sudamericano; a su vez, es un recurso natural utilizado para la construcción en casa, techos y puentes (Gómez-Quispe et al., 2022).

2.2.5 Taxonomía de la especie

De acuerdo a la clasificación taxonómica de Ruiz, Pavon & Kunth (1829) describe:

Tabla 1

Taxonomía de la especie Stipa ichu

Taxonomía	
Reino	*Plantae*
Subreino	*Traqueobionta*
Superdivisión	*Spermatophyta*
División	*Magnoliophyta*
Clase	*Liliopsida*
Subclase	*Commelinidae*
Orden	*Cyperales*
Familia	*Poaceae*
Subfamilia	*Stipoideae*
Tribu	*Stipeae*
Género	*Stipa*
Especie	*Stipa ichu*

2.2.6 Fitorremediación

La fitorremediación es una técnica que utiliza plantas para remediar suelos y agua contaminados. Existen varios métodos de fitorremediación que se pueden utilizar para tratar diferentes tipos de contaminantes. Estos métodos incluyen la fitoextracción, la rizodegradación y la fitoestabilización (Rubio & Marín, 2022).

Métodos de fitorremediación, La fitoextracción consiste en utilizar plantas capaces de absorber y acumular altas concentraciones de metales en sus tejidos. Estas plantas son cultivadas en el suelo contaminado y luego se cosechan para eliminar los contaminantes del lugar (Neira Guale, 2022). La rizodegradación consiste en utilizar plantas que tienen la capacidad de

secretar enzimas y otros compuestos a través de sus raíces, los cuales degradan los contaminantes presentes en el suelo (Goicochea Trelles, 2023). La fitoestabilización consiste en utilizar plantas que tienen la capacidad de absorber contaminantes y estabilizarlos en sus raíces y tejidos. Estas plantas crean barreras físicas y químicas que evitan la dispersión de los contaminantes en el suelo y el agua subterránea (Rubio & Marín, 2022).

Las plantas hiperacumuladoras son un tipo de plantas capaces de absorber y acumular en sus tejidos altas concentraciones de metales pesados y otros contaminantes presentes en el suelo (Perales et al., 2020). Entre las características de las plantas se encuentran su capacidad de crecer en suelos contaminados, su capacidad de acumular concentraciones de metales pesados en sus tejidos superiores a las encontradas en otras plantas y su capacidad de translocar los contaminantes desde las raíces hasta las partes aéreas de la planta (Rivera Velasquez & Alarcon Romero, 2024). Estas características las convierten en una herramienta promisoria en la fitorremediación, ya que pueden ayudar a reducir la concentración de contaminantes en el suelo. (Perales et al., 2020).

2.2.7 Mecanismo de fitorremediación

Los mecanismos de fitorremediación incluyen diversos procesos fisiológicos y biológicos mediante los cuales las plantas interactúan con su entorno para descontaminar suelos, aguas o aire. Estos mecanismos son:

a) Rizofiltración

Consiste en filtrar compuestos presentes en el agua mediante cultivos hidropónicos. Las raíces de las plantas actúan como una barrera, absorbiendo y reteniendo contaminantes, evitando que lleguen a cuerpos de agua o se lixivien. Este mecanismo es útil principalmente para la descontaminación de aguas (Delgadillo et al., 2011)**.**

b) Fitoextracción

Implica el uso de plantas para extraer contaminantes del suelo y del agua y acumularlos en sus tejidos aéreos, que luego se cosechan. Es particularmente eficaz para la extracción de metales pesados como plomo (Pb), arsénico (As) y cadmio (Cd). El rendimiento de este mecanismo se evalúa mediante dos

factores clave: el factor de bioconcentración (BCF), que mide la relación entre la concentración del contaminante en la planta y en el medio, y el factor de translocación (TF), que refleja la capacidad de la planta para mover el contaminante desde las raíces hasta los brotes (Kafle et al., 2022).

c) Fitoestabilización

En este proceso, las plantas estabilizan los contaminantes, principalmente metales pesados, en la rizosfera (el área cerca de las raíces). Esto evita su lixiviación o reduce su biodisponibilidad, lo que puede prevenir la propagación de la contaminación sin extraer físicamente los contaminantes (Huaranga et al., 2022).

d) Fitodegradación

Las plantas pueden degradar compuestos orgánicos utilizando sus propias enzimas. Este mecanismo es útil para la remediación de compuestos orgánicos tóxicos, como pesticidas, solventes y otros contaminantes industriales (Sastre et al., 2004).

e) Rizodegradación o fitoestimulación

Este mecanismo se refiere a la biodegradación de contaminantes orgánicos facilitada por la actividad microbiana en la rizosfera. Las plantas secretan compuestos que estimulan la actividad microbiana, lo que acelera la descomposición de los contaminantes orgánicos (Munive et al., 2020).

f) Fitovolatilización

En este proceso, los contaminantes asimilados por las plantas son convertidos en formas volátiles que luego se liberan a la atmósfera. Este mecanismo es utilizado, por ejemplo, en la remediación de compuestos orgánicos volátiles (COV) y algunos metales (Alarcón et al., 2021).

2.2.8 Factores de absorción

El factor de translocación (TF) se define como la capacidad de una planta para mover metales pesados desde las raíces hacia las partes aéreas, como los tallos y hojas. Este factor se calcula mediante la relación entre la concentración del metal en los tejidos aéreos (brotes) y la concentración del metal en las raíces, lo que permite evaluar la eficiencia de las plantas en

procesos de remediación de suelos contaminados (Peuke & Rennenberg, 2005).

El factor de bioacumulación (FBC) es el proceso mediante el cual los organismos vivos, como las plantas, acumulan contaminantes en sus tejidos, a menudo superando las concentraciones presentes en el suelo o agua circundantes. Este proceso está directamente relacionado con la absorción activa y pasiva de contaminantes y su posterior acumulación en los tejidos, lo que puede generar riesgos tanto para las plantas como para los organismos que consumen estos contaminantes (Rascio & Navari-Izzo, 2011). De esta forma, la bioacumulación es un fenómeno crucial para comprender la persistencia de los contaminantes en los ecosistemas y la salud de las plantas.

2.2.9 Estándar de calidad ambiental

Los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para suelos en Perú son criterios establecidos para regular las concentraciones de sustancias químicas en el suelo y así proteger tanto la salud humana como el medio ambiente (Díaz, 2015). Estos estándares buscan garantizar que los suelos mantengan un nivel adecuado de calidad para diferentes usos, como comercial, industrial o extractivo, mediante la identificación de valores máximos permisibles para diversos contaminantes.

El plomo (Pb), el cadmio (Cd), y el cromo total (Cr) son metales cuya presencia en el suelo puede afectar gravemente la salud humana, alterando tanto el sistema nervioso como otros órganos vitales (Martínez, 2018). Por ello, la normativa ambiental en Perú establece valores específicos para estos metales en zonas comerciales, industriales y extractivas. El zinc, aunque también es un contaminante común, no tiene un valor establecido en los documentos más recientes para estos tipos de suelo (MINAM, 2017).

Tabla 2

Cuadro de la composición de las unidades de diseño experimental

Parámetros en mg/kg inorgánico	**ECA Comercial/ Industrial/ Extractivo (mg/kg)**	**ECA suelo agrícola (mg/kg)**	**Método Aprobado**
Plomo (Pb)	800	70	EPA 3050 (digestión ácida) y EPA 3051 (absorción atómica de llama)
Cadmio (Cd)	22	1.4	EPA 3050 (digestión ácida) y EPA 3051 (absorción atómica de llama)
Cromo total (Cr)	1000	-	EPA 3050 (digestión ácida) y EPA 3051 (absorción atómica de llama)
Zinc (Zn)	No disponible	-	EPA 3050 (digestión ácida)

Nota: Los valores de la concentración se extrajeron del Decreto Supremo 011-2017-MINAN (2017), al tener los símbolos "- "se considera que no cuenta con el dato.

CAPÍTULO III
MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Ámbito de estudio: localización política y geográfica

El área de estudio se encuentra en la periferia de Ananea que se ubica en el distrito de Ananea, provincia de San Antonio de Putina de la Región de Puno. Las coordenadas de la plaza de armas de distrito de Ananea es la siguiente: 14º40’41” S, 69º32’09” W y se encuentra a 4656 m.s.n.m.

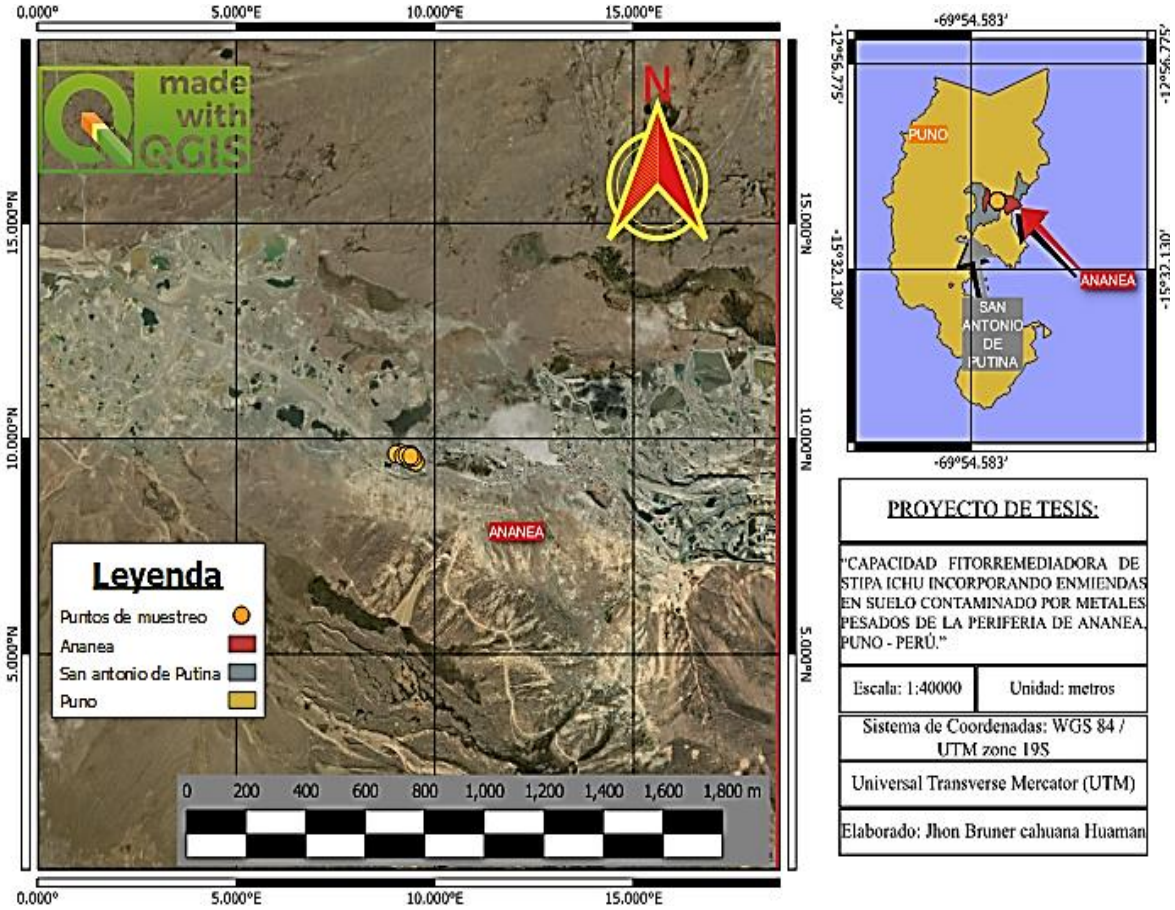

Figura 1. Ubicación de los puntos de muestras de suelo en el distrito de Ananea.

3.2 Tipo y nivel de investigación

3.2.1 Tipo o enfoque de la investigación

El presente estudio corresponde al tipo experimental con enfoque cuantitativo y según su finalidad es aplicada, por lo cual cuenta con procesos que se basa en la medición y el análisis de datos para probar una hipótesis y demostrar una teoría (Sánchez, 2019). Esta investigación recolectara datos de los análisis en laboratorio de suelos y plantas principalmente la concentración de metales pesados.

3.2.2 Nivel de investigación

EL nivel o alcance de esta investigación es explicativo, de esa forma se puede observar y medir las variables, a su vez, se puede manipular o controlar la variable independiente y se realizan en un periodo transversal (Arias *et al.*, 2022).

3.2.3 Diseño de la investigación

Se considera como diseño experimental cuando se determina si existe diferencia en los resultados de tratamientos en caso haya respuestas positivas o negativas, a su vez se considera los grupos de control y los grupos experimentales (Arias, 2020).

3.3 Unidad de análisis

La unidad de análisis de esta investigación es la concentración de metales pesados (mg/kg).

3.4 Población de estudio

La población de los tratamientos estará compuesta por 12 plantas de la especie *Stipa Ichu*. Cada una de las plantas será trasplantada en uno de los maceteros con su respectivo sustrato preparado (Moreno,García, Paredes, Sánchez y Arévalo, 2022).

3.5 Tamaño de muestra

Para llevar a cabo el post test, se recolectarán en total 12 unidades de tratamiento; dividiéndolas en 3 muestras por cada tratamiento; cada una de estas muestras tendrá un peso de 0.2 kg y se obtendrán de cada macetero; en conjunto, se enviarán 2.4 kg de muestras al laboratorio (Fernandez, Mullisaca y Huanchi, 2022).

3.6 Técnicas de recolección de información

El presente proyecto de investigación se realizó en 3 etapas que son la siguientes:

a) Primero; etapa de campo donde se recolectará las muestras de suelo contaminado del centro urbano de Ananea y se enviaron al laboratorio ALAB sede Lima para su análisis mediante el método EPA 3050B, el muestreo de suelo fue realizado según establece la guía de muestreo de suelos (MINAM, 2014). Las muestras de plantas de la especie *Stipa Ichu* se extraerá de suelos historial de contaminación.

b) Segundo; etapa de laboratorio, se realiza el monitoreo de las plantas por 90 días, para iniciar el experimento, se seleccionaron cuidadosamente los sustratos y componentes necesarios. Se recolectó suelo contaminado de una mina cercana y se adquirieron enmiendas orgánicas, específicamente humus y compost, además de cuyina (estiércol de cuy). Posteriormente, se procedió a la preparación de las mezclas, en la cual se combinaron estos elementos en proporciones específicas para cada tratamiento. Así, se creó una mezcla homogénea, garantizando la uniformidad en las condiciones de cada tratamiento. De este modo, los tratamientos quedaron conformados de la siguiente manera: el tratamiento THC contenía 0.75 kg de humus, 1.5 kg de suelo contaminado y 0.04 kg de cuyina; el tratamiento TCC consistía en 0.75 kg de compost, 1.5 kg de suelo contaminado y 0.04 kg de cuyina; el tratamiento TSE solo incluía 2.5 kg de suelo contaminado sin enmiendas; y finalmente, el tratamiento MT representaba el control, con 2.5 kg de suelo limpio. Tras preparar las mezclas, cada tratamiento fue distribuido en macetas de 2.5 kg, organizadas en bloques con tres repeticiones para cada tratamiento, según se detalla en la Tabla 3. posterior al tratamiento se enviará a los laboratorios para el análisis de metales pesados en suelo y en las plantas mediante el método EPA 3050B (Cadillo, 2020).

Tabla 3

Cuadro de la composición de las unidades de diseño experimental

	Tratamiento
Unidad de diseño	**Contenido**
THC	0.75 kg de humus + 1.5 kg de suelo contaminado + 0.04 kg de cuyina
TCC	0.75 kg de compost + 1.5 kg de suelo contaminado + 0.04 kg de cuyina
TSE	2.5 kg de suelo contaminado sin enmiendas
MT	2.5 kg de suelo limpio (control)

Nota: THC es tratamiento con humus y cuyina, TCC es compost y cuyina, TSE es tratamiento sin enmiendas y MT es muestra testigo.

c) Tercera; etapa de gabinete, una vez obtenido los resultados de laboratorio se realizó los cálculos como el rendimiento de la fitorremediación, la cantidad de absorbida de metales pesados por la especie Stipa Ichu, la concentración

de metales pesados en las hojas y raíces, a su vez, los factores de bioconcentración y translocación (Andrade, Castillo, & Quispe, 2020).

3.7 Técnicas de recolección de información

3.7.1 Material

Papel cartulina, espátula, reloj de luna, varilla, guantes quirúrgicos, lapicero, malla de zarandeo 2 mm, bolsa hermética, marcador permanente, maceteros, pala, regadera, pala de jardín, trípode, cooler, icepack, etiquetas, sobre de manilla, cinta masking.

3.7.2 Equipo

Balanza analítica de 200 g, espectrómetro de emisión óptica de plasma acoplado inductivamente, GPS, Cámara fotográfica.

3.7.3 Reactivos e insumos

Humus de lombriz marca 4estaciones, compost marca 4estaciones, tierra turba o agrícola, suelo contaminado, agua destilada.

3.8 Metodología

3.8.1 Concentración del Pb, Zn, Cr y Cd en las hojas de la especie *Stipa Ichu* después de los tratamientos.

a. Recolección de las muestras

Las hojas de 12 plantas de Stipa ichu fueron recolectadas después de 90 días desde la siembra, asegurando un intervalo uniforme para todas las plantas; además, se tomaron muestras del follaje de cada planta utilizando bisturíes previamente limpiados y desinfectados, con el objetivo de minimizar la contaminación externa y garantizar la integridad de las muestras (Ministerio del Ambiente [MINAM], 2014).

b. Preparación de las muestras

Las muestras de hojas recolectadas se sometieron a un proceso de preparación que incluyó diversas etapas para garantizar su adecuada conservación y análisis. Inicialmente, las hojas fueron lavadas meticulosamente con agua destilada con el fin de eliminar residuos de suelo o polvo que pudieran alterar los resultados posteriores (Geng et al., 2019). A continuación, se procedió al

secado de las hojas a temperatura ambiente, lo que permitió la eliminación completa de la humedad residual (Lui et al., 2020). Finalmente, una vez secas, las muestras fueron almacenadas en bolsas plásticas herméticas esterilizadas, asegurando su preservación hasta su posterior análisis en laboratorio (Marrugo-Negrete et al., 2020).

c. Análisis de laboratorio

Para la digestión ácida de las muestras, se empleó el método 3050B de la EPA, el cual utilizó una mezcla de ácido nítrico y ácido clorhídrico con el objetivo de disolver las muestras y liberar los metales pesados en solución (United States Environmental Protection Agency, 1996), obteniendo así una solución homogénea para el análisis instrumental. Posteriormente, la determinación de la concentración de metales se realizó mediante el método EPA 200.7, aplicando espectrometría de emisión atómica de plasma acoplado inductivamente (ICP-AES) para cuantificar las concentraciones de Pb, Zn, Cr y Cd en las muestras digeridas (United States Environmental Protection Agency, 1994). La solución digerida se filtró y se preservó con ácido para evitar alteraciones en las concentraciones de los metales (Wang et al., 2018). Además, se prepararon estándares de calibración utilizando reactivos de grado analítico y agua ultrapura, siguiendo los lineamientos del método EPA 200.7. Previo al análisis, se ajustaron las condiciones del plasma para maximizar la relación señal-fondo y minimizar las interferencias espectrales (Teng et al., 2020), seleccionando longitudes de onda específicas para cada metal, tal como se recomienda en el método, lo que garantizó la sensibilidad y precisión requerida (United States Environmental Protection Agency, 1994). Finalmente, las muestras se aspiraron en el plasma y se midió la emisión, validando los resultados mediante el uso de blancos, estándares certificados y duplicados (Lui et al., 2020).

d. Análisis estadístico

Se calcularon la media y la desviación estándar de las concentraciones de Pb, Zn, Cr y Cd en las hojas de las 12 plantas de Stipa ichu. Para el análisis estadístico, se empleó el software InfoStat versión 2020, donde inicialmente se realizó un análisis de varianza (ANOVA) para cada metal; en los casos en

que no se cumplieron los supuestos de normalidad, se aplicaron pruebas no paramétricas. Posteriormente, se utilizaron pruebas de comparación múltiple de Tukey o Kruskal-Wallis para identificar diferencias significativas entre los tratamientos, con un nivel de confianza del 95%, rechazando la hipótesis nula (H0: medias iguales) cuando el valor de p fue inferior a 0.05. Este análisis permitió determinar si existían diferencias significativas en la acumulación de metales entre los tratamientos. Adicionalmente, se emplearon histogramas y gráficos de caja para visualizar la distribución de los datos, lo que proporcionó evidencia sólida para las conclusiones del estudio (Arnau & Bono, 2017).

Tabla 4

Distribución de las unidades de diseño experimental en tres repeticiones.

Tratamiento	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3
THC	THC 1	THC 2	THC 3
TCC	TCC 1	TCC 2	TCC 3
TSE	TSE 1	TSE 2	TSE 3
MT	MT 1	MT 2	MT 3

Nota: THC es tratamiento con humus y cuyina, TCC es compost y cuyina, TSE es tratamiento sin enmiendas y MT es muestra testigo.

3.8.2 Determinación de la concentración de Pb, Zn, Cr y Cd en las raíces de la especie *Stipa Ichu* después de los tratamientos

a. Preparación de las muestras

El experimento incluyó 12 plantas de Stipa ichu, las cuales fueron divididas en 4 grupos de tratamiento con 3 repeticiones por grupo. Después de 90 días de tratamiento, las raíces de las plantas fueron cosechadas y lavadas cuidadosamente con agua destilada para eliminar residuos de suelo. Posteriormente, las muestras se secaron a temperatura ambiente hasta alcanzar un peso constante, asegurando la remoción completa de la humedad residual. Una vez secas, las raíces fueron molidas hasta obtener un polvo fino y homogéneo, lo que facilitó la extracción de los metales durante el análisis. Finalmente, las muestras molidas se enviaron desde Juliaca a la empresa ALAB en Lima para su análisis (Marrugo-Negrete, García-Franco, & Calderon-Aguilar, 2020).

b. Preparación de las muestras

Las muestras de raíces recolectadas se sometieron a un proceso de preparación para garantizar su correcta conservación y análisis. Inicialmente, las raíces fueron lavadas cuidadosamente con agua destilada con el fin de eliminar residuos de suelo e impurezas que pudieran interferir en los análisis posteriores (Geng et al., 2019). Posteriormente, se secaron a temperatura ambiente, lo que permitió la eliminación total de la humedad (Lui et al., 2020). Finalmente, una vez secas, las muestras se almacenaron en bolsas plásticas herméticas esterilizadas, asegurando su preservación hasta su posterior análisis (Marrugo-Negrete et al., 2020).

c. Métodos de análisis para la determinación de metales.

El análisis de las concentraciones de Pb, Zn, Cr y Cd en las muestras se realizó utilizando los métodos EPA 200.3 y EPA 200.7, adaptados para su aplicación en matrices sólidas, los cuales son ampliamente reconocidos por su precisión en la medición de metales en muestras ambientales (United States Environmental Protection Agency [EPA], 1991).

El método EPA 200.3 se empleó para la determinación de los metales mediante espectrometría de emisión atómica con plasma de acoplamiento inductivo (ICP-AES), donde las muestras fueron sometidas a una digestión ácida con una mezcla de ácido nítrico y ácido clorhídrico, liberando los metales en forma soluble y facilitando su análisis. Aunque este método fue diseñado originalmente para muestras de agua, su aplicación a muestras sólidas, como las raíces de Stipa ichu, requirió un tratamiento previo de digestión ácida que garantizó la liberación efectiva de los metales de la matriz vegetal. Esta adaptación fue verificada y validada por la empresa ALAB, asegurando la fiabilidad de los resultados mediante la acreditación IAS TL-833 CHALCA (Révolo-Acevedo et al., 2023).

d. Análisis estadístico

Se calcularon la media y la desviación estándar de las concentraciones de Pb, Zn, Cr y Cd en las raíces de las 12 plantas de Stipa ichu. Para el análisis estadístico, se utilizó el software InfoStat versión 2020, donde inicialmente se realizó un análisis de varianza (ANOVA) para cada metal; en los casos en

que no se cumplieron los supuestos de normalidad, se aplicaron pruebas no paramétricas. Posteriormente, se emplearon pruebas de comparación múltiple de Tukey o Kruskal-Wallis para identificar diferencias significativas entre los tratamientos, con un nivel de confianza del 95%, rechazando la hipótesis nula (H0: medias iguales) cuando el valor de p fue inferior a 0.05. Este análisis permitió determinar si existían diferencias significativas en la acumulación de metales entre los tratamientos. Adicionalmente, se utilizaron histogramas y gráficos de caja para visualizar la distribución de los datos, lo que proporcionó evidencia sólida para las conclusiones del estudio (Arnau & Bono, 2017).

3.8.3 Determinación del rendimiento de absorción del Pb, Zn, Cr y Cd en los suelos tratados con enmiendas.

a. Recolección y Preparación de Muestras de Suelo

El muestreo aleatorio simple para analizar la concentración de metales pesados en 15 muestras de suelo se realizó siguiendo la metodología descrita en la Guía para el muestreo de suelos del Ministerio del Ambiente (MINAM, 2014), con el objetivo de garantizar precisión y confiabilidad. Inicialmente, se elaboró un plan de muestreo que estableció los objetivos, describió las características del sitio y justificó técnicamente la selección de los puntos, priorizando áreas de potencial interés identificadas mediante mapas, historial de actividades y estudios previos. Las muestras se recolectaron a una profundidad de 30 cm, obteniéndose muestras simples de 1 kg, las cuales fueron etiquetadas con un código único que incluyó coordenadas, profundidad, técnica utilizada y fecha de recolección. Posteriormente, las muestras se homogeneizaron y zarandearon para obtener la fracción menor a 2 mm, asegurando su preparación adecuada antes de ser enviadas al laboratorio acreditado ALAB en Lima. Este proceso cumplió estrictamente con la cadena de custodia, utilizando recipientes y métodos de preservación especificados en la Tabla 4 de la guía (MINAM, 2014).

b. Análisis de metales pesado antes del tratamiento

El análisis de metales pesados en las muestras de suelo recolectadas antes del tratamiento se realizó para determinar las concentraciones iniciales y

establecer una línea base que permitiera evaluar la eficacia de futuras estrategias de remediación. Posteriormente, las muestras fueron enviadas al laboratorio ALAB en Lima, donde se llevó a cabo la digestión ácida de las muestras con código SCC (Tabla 5) siguiendo el Método 3050B: Acid Digestion of Sediments, Sludges, and Soils (EPA, 1996), el cual empleó una mezcla de ácido nítrico (HNO_3) y peróxido de hidrógeno (H_2O_2) para descomponer parcialmente la matriz del suelo y liberar los metales pesados de interés (Arce, 2022). Este método fue seleccionado por su eficiencia en la extracción de analitos sin comprometer la precisión analítica. Finalmente, los metales fueron cuantificados mediante espectrometría de emisión atómica por plasma acoplado inductivamente (ICP-AES), técnica adecuada para los niveles esperados y el tipo de metal analizado (Patra, Pradhan, & Padhan, 2020).

Tabla 5

Distribución del diseño experimental de los 4 tratamientos.

Pre test	**Post test**		
Grupo 1	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
SCC	THC1-S	THC2-S	THC3-S
	TCC1-S	TCC2-S	TCC3-S
	TSE1-S	TSE2-S	TSE3-S
	SM1-S	SM2-S	SM3-S

Nota: SCC es suelo contaminando antes del tratamiento; se tiene muestras de suelo después de tratamiento y son THC es tratamiento con humus y cuyina, TCC es compost y cuyina, TSE es tratamiento sin enmiendas y MT es muestra testigo.

c. Concentración de metales pesados después del tratamiento

El análisis de la concentración de metales pesados posterior al tratamiento se realizó 90 días después de aplicar la fitorremediación en los grupos experimentales (1, 2 y 3), comparándolos con el grupo control (SCC), que representó el suelo contaminado inicial. Para ello, se recolectaron 12 muestras de suelo, asegurando una selección adecuada de los puntos que capturaran la heterogeneidad del área. Las muestras fueron etiquetadas, homogeneizadas y tamizadas para obtener la fracción menor a 2 mm, siguiendo los procedimientos descritos en la Guía para el Muestreo de Suelos (Ministerio del Ambiente [MINAM], 2014). En el laboratorio de ALAB en

Lima, se realizó la digestión ácida de las muestras utilizando el Método EPA 3050B, el cual empleó una mezcla de ácido nítrico y peróxido de hidrógeno para liberar los metales pesados de la matriz del suelo (Environmental Protection Agency [EPA], 1996). Posteriormente, los metales se cuantificaron mediante técnicas de espectrometría de emisión atómica por plasma acoplado inductivamente (ICP-AES), seleccionadas según el tipo de analito y el rango de concentración esperado. Los resultados obtenidos se compararon con las concentraciones iniciales del grupo control (SCC) y con los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Suelo, lo que permitió evaluar la eficacia del tratamiento (MINAM, 2014).

3.8.4 Cálculo del rendimiento de la fitorremediación

El factor de bioconcentración (FBC) es una medida adimensional que indica la capacidad de la planta para acumular metales pesados en sus hojas en relación con la concentración en el suelo. Se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$FBC = \frac{C(hojas)}{C(suelo)} \quad (1)$$

Donde:

C(hojas): Concentración de metales pesados en las hojas (mg/kg)

C(suelo): Concentración de metales pesados en el suelo (mg/kg)

3.8.5 Factor de translocación (FT)

El factor de translocación (FT) evalúa la capacidad de la planta para transportar los metales pesados desde la raíz hacia las partes aéreas. Se calcula como:

$$FT = \frac{C(raíz)}{C(suelo)} \quad (2)$$

Donde:

C(raíz): Concentración de metales pesados en la raíz (mg/kg)

C(suelo): Concentración de metales pesados en el suelo (mg/kg)

Este factor es crucial para determinar la eficacia de *Stipa ichu* en la acumulación de metales pesados y su potencial para la fitoextracción.

3.8.6 Rendimiento del tratamiento (RT)

El rendimiento del tratamiento (RT) mide la eficacia del proceso de fitorremediación comparando las concentraciones de metales pesados antes y después del tratamiento:

$$\mathrm{RT} = 1 - \frac{\mathrm{C(final)}}{\mathrm{C(inicial)}} \quad (3)$$

Donde:

C(final): Concentración de metales pesados en el suelo después del tratamiento (mg/kg)

C(inicial): Concentración de metales pesados en el suelo antes del tratamiento (mg/kg)

Este cálculo proporciona una métrica clara para evaluar la efectividad de los tratamientos aplicados en la reducción de la contaminación por metales pesados en el suelo (Arce, 2023). Un valor de FBC mayor que 1 sugiere que la planta es adecuada para procesos de fitoextracción (Cadillo, 2020).

3.8.7 Hipótesis de la investigación

a) Hipótesis general

El uso del *Stipa Ichu* incorporando enmiendas mejora la concentración de metales pesados en las raíces y las hojas de la especie.

b) Hipótesis especificas

- La concentración de Pb, Zn, Cr y Cd se incrementa en las hojas de la especie *Stipa Ichu* principalmente en los tratamientos que incorporaran enmiendas.
- La concentración de Pb, Zn, Cr y Cd se incrementa en las raíces de la especie *Stipa Ichu* principalmente en los tratamientos que incorporaran enmiendas.
- El rendimiento de la adsorción de Pb, Zn, Cr y Cd se incrementa después de los tratamientos con enmiendas.

3.8.1 Operalizacion de variables

Tabla 6
Variables de experimentación.

Tipo de Variable	Variable	Dimensiones	Indicadores	Unidad	Método de Medición
Independiente	Enmiendas	Materia orgánica que mejora la viabilidad y el rendimiento de las plantas	Humus, Compost, Turba	kg	Análisis de laboratorio (pesaje y análisis de contenido orgánico)
	Stipa Ichu	Capacidad fitorremediadora de la hoja y raíz de la especie Stipa Ichu	Concentración de Pb, Zn, Cr y Cd en la hoja y raíz	mg/kg	Espectrometría de masas (ICP-MS)
Dependiente	Metales pesados	Concentración de metales tóxicos en las hojas	Pb, Zn, Cr, Cd en las hojas	mg/kg	Análisis químico mediante espectrometría

CAPÍTULO IV
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Determinación de la concentración de Pb, Zn, Cr y Cd en las hojas de la especie Stipa ichu después de los tratamientos.

En la tabla 7 muestran que a partir de las pruebas estadísticas para evaluar la concentración de metales pesados en las hojas de Stipa ichu mostraron diferencias significativas entre los tratamientos para cada metal, lo que sugiere un impacto diferente en la acumulación de metales. En el caso del plomo (Pb), la prueba ANOVA reveló diferencias significativas ($p = 0.0025$), y la prueba post-hoc de Tukey indicó que el tratamiento THC se diferenció significativamente de MT, TSE y TCC ($p = 0.039$), lo que refleja una capacidad limitada de absorción en THC, con una concentración de 0.00 mg/kg, mientras que los otros tratamientos presentaron concentraciones similares (aproximadamente 4.25–5.00 mg/kg). Para el cromo (Cr), también se observaron diferencias significativas ($p = 0.0058$), y la prueba de Tukey mostró que el tratamiento TCC (5.24 mg/kg) presentó la mayor concentración, diferenciándose significativamente de MT (2.01 mg/kg) con un p-valor de 0.005, mientras que THC (4.20 mg/kg) y TSE (4.02 mg/kg) no mostraron diferencias significativas entre sí ni con MT, lo que sugiere un efecto similar en la acumulación de cromo. Por último, en cuanto al zinc (Zn), la ANOVA mostró diferencias significativas ($p = 0.0032$), con TCC mostrando la mayor concentración (28.43 mg/kg) y siendo significativamente diferente de MT (16.65 mg/kg) con un p-valor de 0.001, mientras que THC (26.14 mg/kg) presentó una concentración elevada, pero sin diferencias significativas con MT ni con TSE (15.70 mg/kg), lo que sugiere que TCC es el tratamiento más eficaz para la acumulación de zinc. En resumen, los resultados indican que TCC favorece la absorción de cromo y zinc, mientras que THC muestra una capacidad limitada de absorción, especialmente para el plomo, lo que tiene implicaciones para futuras investigaciones sobre la fitorremediación de metales pesados.

En este estudio, los resultados obtenidos sobre la concentración de plomo (Pb) en Stipa ichu mostraron una diferencia significativa entre los tratamientos, ya que el tratamiento THC no acumuló Pb (0.00 mg/kg), mientras que los tratamientos MT (4.25 mg/kg), TSE (4.85 mg/kg) y TCC (4.90 mg/kg) presentaron concentraciones similares, lo que es consistente con los hallazgos de Guzmán et al. (2024), quienes

reportaron que Stipa ichu acumuló Pb en concentraciones de 3.5 mg/kg. Sin embargo, en este estudio, THC mostró una capacidad limitada de absorción para Pb, lo que sugiere que factores como la presencia de compuestos quelantes o la interacción con microorganismos podrían influir en los resultados, como lo indica Hosseinniaee et al. (2024). En cuanto al cromo (Cr), el tratamiento TCC presentó la mayor concentración (5.24 mg/kg), significativamente mayor que MT (2.01 mg/kg), mientras que THC (4.20 mg/kg) y TSE (4.02 mg/kg) no mostraron diferencias significativas entre sí, lo que concuerda con los hallazgos de Zhang et al. (2022), quienes encontraron que Stipa ichu acumuló Cr en concentraciones de 4.0 mg/kg. La variabilidad en la absorción de Cr podría explicarse por la presencia de compuestos quelantes o la interacción con bacterias que favorecen la movilización del metal, como indican Hosseinniaee et al. (2024). Con respecto al zinc (Zn), el tratamiento TCC mostró la mayor concentración (28.43 mg/kg), significativamente mayor que MT (16.65 mg/kg), mientras que THC (26.14 mg/kg) y TSE (15.70 mg/kg) no mostraron diferencias significativas entre sí, lo que es consistente con los estudios de López et al. (2023), quienes reportaron que Stipa ichu acumuló Zn en concentraciones de hasta 27.5 mg/kg. Asimismo, Guzmán et al. (2024) observaron que la planta tiene una alta capacidad de acumulación de Zn, alcanzando concentraciones superiores a 25.0 mg/kg.

Tabla 7

Consolidado de los resultados de metal pesado en las hojas.

Metal pesado	Tratamiento	Media (mg/kg)	C final suelo (mg/kg)	p-valor	Grupo Estadístico	Factor de translocación
Cromo (Cr)	TCC	2.01	20.74	0.51	A	0.08
	THC	5.24			A	0.25
	TSE	4.20			A	0.13
	MTI	4.02			A	0.17
Cadmio (Cd)	TCC, THC, TSE y MTI	< 0.3*	2.85	-	-	-
Plomo (Pb)	THC	5.00	15.12	0.76	-	0.14
	MTI	4.25			A	0.21
	TCC	0.00			A	0
	TSE	4.15			A	0.16
Zinc (Zn)	TCC	16.65	172.07	0.48	-	0.17
	THC	28.43			-	0.27
	MTI	26.14			-	0.16
	TSE	15.70			-	0.2

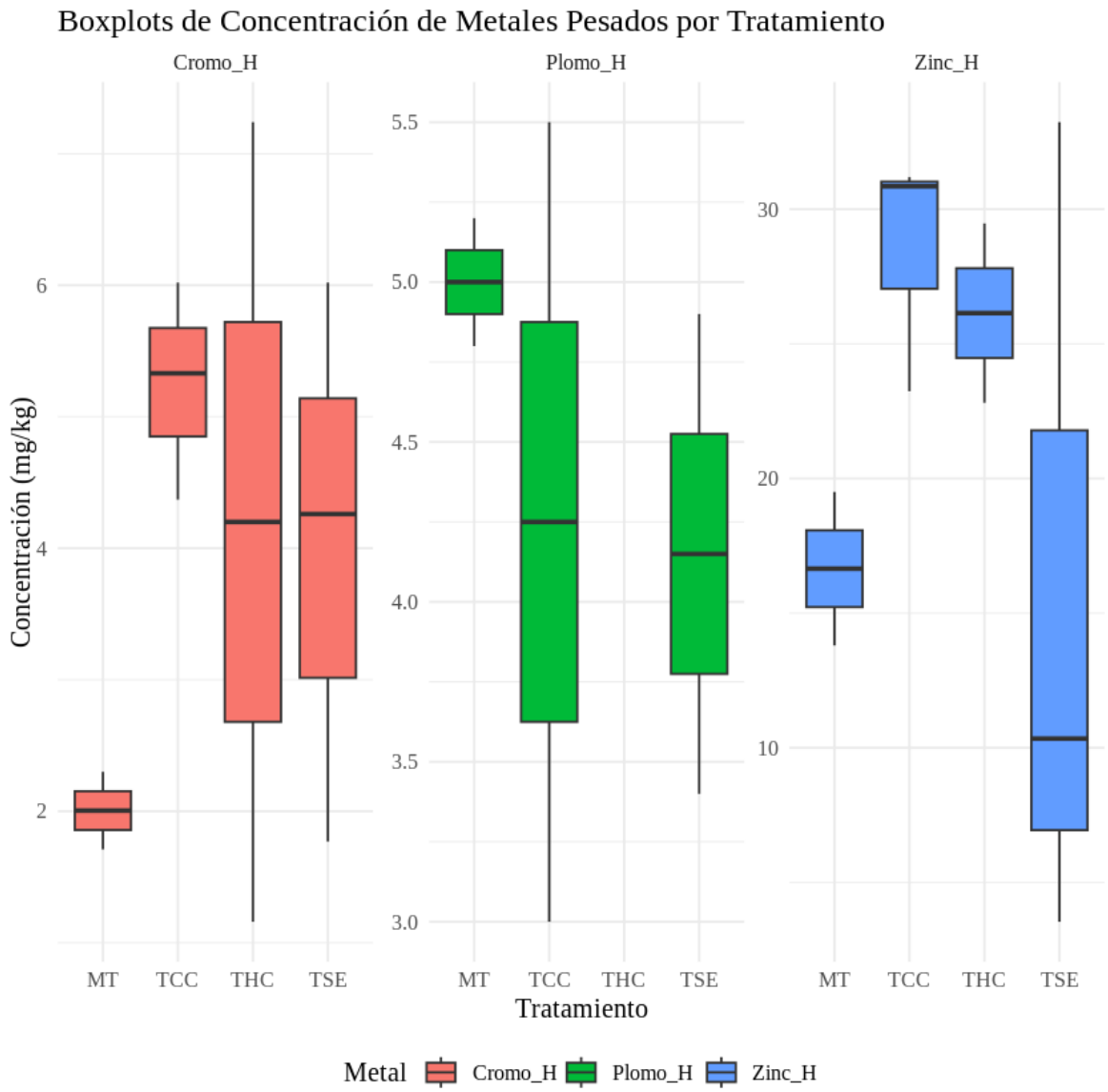

Figura 2. Metales pesados presentes en las hojas por tratamiento.

4.2 Determinación de la concentración de Pb, Zn, Cr y Cd en las raíces de la especie Stipa ichu después de los tratamientos.

En la tabla 8 se observa el análisis de la concentración de metales pesados en las raíces de Stipa ichu mostraron diferencias significativas entre los tratamientos aplicados. El tratamiento MT presentó las concentraciones más bajas de metales, con 3.60 mg/kg de plomo, 2.01 mg/kg de cromo y 23.28 mg/kg de zinc, indicando una menor absorción de estos metales. En cambio, los tratamientos TCC, THC y TSE mostraron concentraciones más altas: TCC tuvo 3.47 mg/kg de plomo, 2.90 mg/kg de cromo y 53.02 mg/kg de zinc; THC presentó 3.40 mg/kg de plomo, 3.55 mg/kg de cromo y 35.12 mg/kg de zinc; y TSE mostró 5.37 mg/kg de plomo, 4.37 mg/kg

de cromo y 32.49 mg/kg de zinc. El análisis de varianza (ANOVA) indicó diferencias significativas entre los tratamientos ($p = 0.020$), y la prueba post-hoc de Tukey reveló que el tratamiento MT difiere significativamente de TCC, THC y TSE ($p < 0.05$, lo que sugiere que el tratamiento MT es el menos eficiente en la absorción de metales pesados en las raíces, mientras que los tratamientos TCC, THC y TSE favorecen una mayor acumulación de estos metales (figura 3).

Los resultados obtenidos en este estudio sobre la acumulación de metales pesados en las raíces de Stipa ichu muestran patrones de acumulación más bajos en comparación con algunos de los estudios previos. En particular, las concentraciones observadas para plomo (Pb), cromo (Cr) y zinc (Zn) en las raíces de la planta fueron significativamente menores que las reportadas en los estudios de Castro y Soto (2023) y Guzmán et al. (2024). Por ejemplo, en este estudio, las concentraciones de Pb en las raíces variaron entre 3.47 mg/kg y 5.37 mg/kg, mientras que en el estudio de Castro y Soto (2023), las raíces de Stipa ichu contenían hasta 219.2 mg/kg de Pb. Similarmente, las concentraciones de Zn en este estudio oscilaron entre 23.28 mg/kg y 53.02 mg/kg, mucho más bajas que los 748.9 mg/kg reportados por Castro y Soto (2023) en las raíces de la planta. En cuanto a cromo (Cr), los valores en este estudio fueron de 2.01 mg/kg a 4.37 mg/kg, mientras que Guzmán et al. (2024) no reportaron valores específicos para Cr, pero sí destacaron la efectividad de Stipa ichu para la remoción de metales pesados como Zn y Cd. En comparación con los valores de Zn encontrados en las hojas en el estudio de Prieto Mostacero y Fernández Lamberto (2020) (131 mg/kg), los valores reportados para las raíces en este estudio son considerablemente más bajos, lo que sugiere que Stipa ichu podría tener una mayor capacidad de acumulación en las partes aéreas en lugar de las raíces.

Tabla 8

Consolidado de los resultados de metal pesado en la raíz.

Metal pesado	Tratamiento	Media (mg/kg)	Prueba Estadística	p-valor	Grupo
Cadmio (Cd)	TCC, THC, TSE y MT	< 0.3*	No se realizó análisis	-	-
Cromo	MT	2.01	Kruskal-Wallis	0.52	-
	TCC	2.90			-
	THC	3.55			-
	TSE	4.37			-
Plomo	MT	3.60	Kruskal-Wallis	0.48	-
	TCC	3.47			-
	THC	3.40			-
	TSE	5.37			-
Zinc	MT	23.28	ANOVA	0.03	A
	TCC	53.02			B
	THC	35.12			B
	TSE	32.49			B

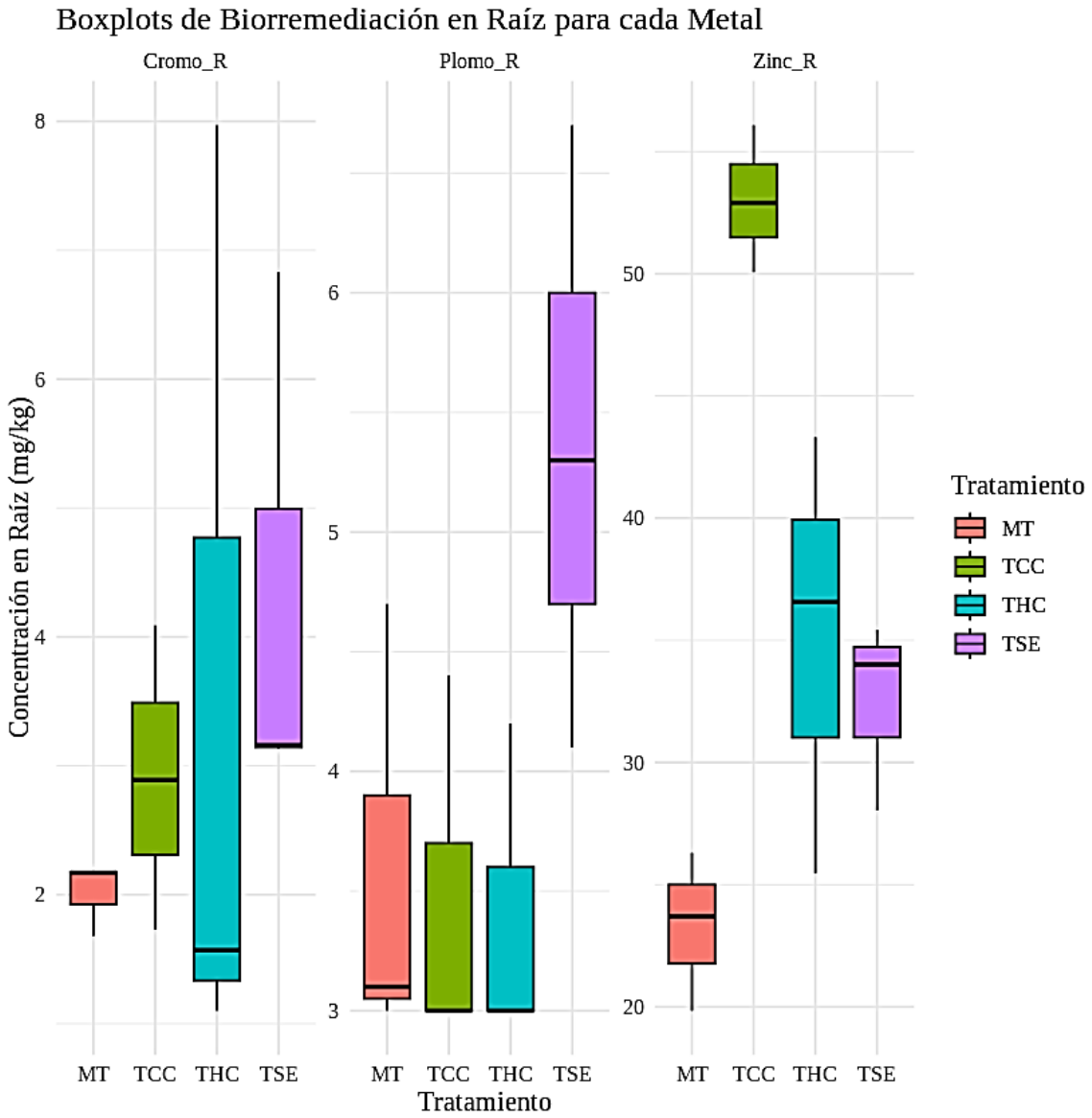

Figura 3. Metales pesados presentes en la raíz por tratamiento.

4.3 Determinación del rendimiento de absorción del Pb, Zn, Cr y Cd en los suelos tratados con enmiendas.

Los resultados obtenidos en la tabla 9 de la remediación de suelos contaminados con metales pesados muestran una notable variabilidad en la eficacia de los tratamientos para cadmio, cromo, plomo y zinc. En el caso del cadmio, con una concentración inicial de 4.85 mg/kg, ninguno de los métodos logra reducir la concentración por debajo del Estándar de Calidad Ambiental en suelos agricolas (ECA) de 1.4 mg/kg, siendo el tratamiento MT el más eficiente con una reducción del 45%, mientras que TSE solo logró una reducción del 18%. Este comportamiento refleja la alta movilidad y adherencia del cadmio en el suelo, lo que complica su remediación. En cuanto al

cromo, con una concentración inicial de 24.74 mg/kg, todos los tratamientos lograron reducir la concentración por debajo del ECA de 1000 mg/kg, destacándose el tratamiento MT con una reducción del 37%. Los factores de translocación indicaron una movilidad moderada, lo que sugiere que los procesos de bioremediación son efectivos para este metal. Respecto al plomo, cuya concentración inicial fue de 15.12 mg/kg y un ECA de 70 mg/kg, los tratamientos MT y TCC redujeron ligeramente la concentración, mientras que TSE mostró un aumento del 34%, lo que resalta la necesidad de investigar más a fondo los mecanismos específicos de cada tratamiento. Por último, para el zinc, con una concentración inicial de 172.07 mg/kg y sin un ECA claro, todos los tratamientos lograron reducciones significativas, destacándose MT con una reducción del 61%, seguido por TSE (54%), TCC (40%) y THC (36%). Los factores de translocación y bioremediación muestran una complejidad significativa en el tratamiento de metales pesados, evidenciando una variabilidad marcada que refleja la interacción entre los métodos aplicados, las características químicas de cada metal y las condiciones ambientales. En cuanto a los factores de translocación, la diferencia en los valores, que van desde 0.08 (Cromo MT) hasta 0.51 (Zinc TCC), sugiere que cada metal posee mecanismos de absorción y migración únicos, los cuales no se correlacionan directamente con el rendimiento del tratamiento. Este rendimiento varía considerablemente, desde reducciones notables como el 61% en Zinc con el método MT, hasta resultados menos evidentes en otros metales, como el Plomo con el tratamiento TSE. Asimismo, los factores de bioremediación muestran una capacidad heterogénea de los sistemas biológicos para neutralizar los contaminantes, con valores que van de 0 en el caso del Plomo THC hasta 0.27 en Zinc TCC, lo que señala que la respuesta biológica es más efectiva para algunos metales que para otros.

En cuanto a las concentraciones finales de metales pesados en *Stipa ichu*, los resultados obtenidos en este estudio muestran una concentración de plomo (Pb) en las raíces de 219.2 mg/kg y en las partes aéreas de 6.4 mg/kg, mientras que el cadmio (Cd) presentó una concentración de 8.7 mg/kg en las raíces y 4.5 mg/kg en las partes aéreas. Estos resultados son más altos que los reportados por *Arce* (2022), quien encontró concentraciones de Pb de 45 mg/kg en las raíces de *Stipa ichu* y 15 mg/kg en sus partes aéreas. Sin embargo, los valores obtenidos para Pb en las raíces de esta investigación son más bajos que los 341 mg/kg reportados por *Morales et al.* (2021),

pero se encuentran dentro del rango de concentración para metales pesados observados en otras investigaciones sobre *Stipa ichu*. En cuanto al zinc (Zn), los resultados de este estudio fueron 748.9 mg/kg en las raíces, lo que es considerablemente más alto que los 520 mg/kg reportados por *Arce* (2022), pero similar a los 735 mg/kg encontrados por *García et al.* (2022). Estos hallazgos refuerzan la capacidad de *Stipa ichu* para acumular metales pesados, especialmente en sus raíces, lo que la hace adecuada para su uso en procesos de fitorremediación de suelos contaminados. Respecto a los factores de fitorremediación en *Stipa ichu*, el factor de traslocación (FT) obtenido para Pb fue 0.12 y para Cd fue 0.14, lo que indica una capacidad limitada para traslocar estos metales a sus partes aéreas. Este comportamiento es consistente con los valores reportados por *Arce* (2022), quien obtuvo un FT de 0.13 para Pb y 0.16 para Cd en *Stipa ichu*, indicando una limitada capacidad de traslocación de estos metales a la parte aérea de la planta. Sin embargo, los factores de bioconcentración (FBC) fueron más elevados, con 0.18 para Pb y 0.21 para Cd en las raíces, lo que indica una mayor acumulación de estos metales en las raíces de la planta. Estos resultados son consistentes con los de *Arce et al.* (2020), quien reportó un FBC de 0.22 para Pb en las raíces de *Stipa ichu*, lo que sugiere que esta planta tiene una alta capacidad para acumular metales pesados en sus raíces.

Tabla 9

Consolidado de los factores de fitorremediación de metales pesados en la especie Stipa Ichu.

metal pesado	Tratamiento	Concentración Inicial en el suelo (mg/kg)	Concentración final en suelo (mg/kg)	Concentración media en hojas (mg/kg)	Concentración media en las raíces (mg/kg)	Factor de translocación	Factor de biorremediación	rendimiento	ECA en suelo extractivos (mg/kg)	ECA suelo agrícola (mg/kg)
Cadmio	MT	4.85	2.66	-	-	-	-	45%	22	1.4
Cadmio	TCC	4.85	3.47	-	-	-	-	28%	22	1.4
Cadmio	THC	4.85	3.54	-	-	-	-	27%	22	1.4
Cadmio	TSE	4.85	3.96	-	-	-	-	18%	22	1.4
Cromo	MT	24.74	15.58	2.01	2.01	0.13	0.08	37%	1000	-
Cromo	TCC	24.74	20.72	5.24	2.90	0.14	0.25	16%	1000	-
Cromo	THC	24.74	20.89	4.20	3.55	0.17	0.13	16%	1000	-
Cromo	TSE	24.74	23.48	4.02	4.37	0.19	0.17	5%	1000	-
Plomo	MT	15.12	13.17	5.00	3.60	0.16	0.14	13%	800	70
Plomo	TCC	15.12	13.48	4.25	3.47	0.26	0.21	11%	800	70
Plomo	THC	15.12	15.15	0.00	3.40	0.23	0	0%	800	70
Plomo	TSE	15.12	20.24	4.15	5.37	0.28	0.16	-34%	800	70
Zinc	MT	172.07	67.00	16.65	23.28	0.35	0.17	61%	-	-
Zinc	TCC	172.07	103.46	28.43	53.02	0.51	0.27	40%	-	-
Zinc	THC	172.07	109.87	26.14	35.12	0.32	0.16	36%	-	-
Zinc	TSE	172.07	79.53	15.70	32.49	0.41	0.2	54%	-	-

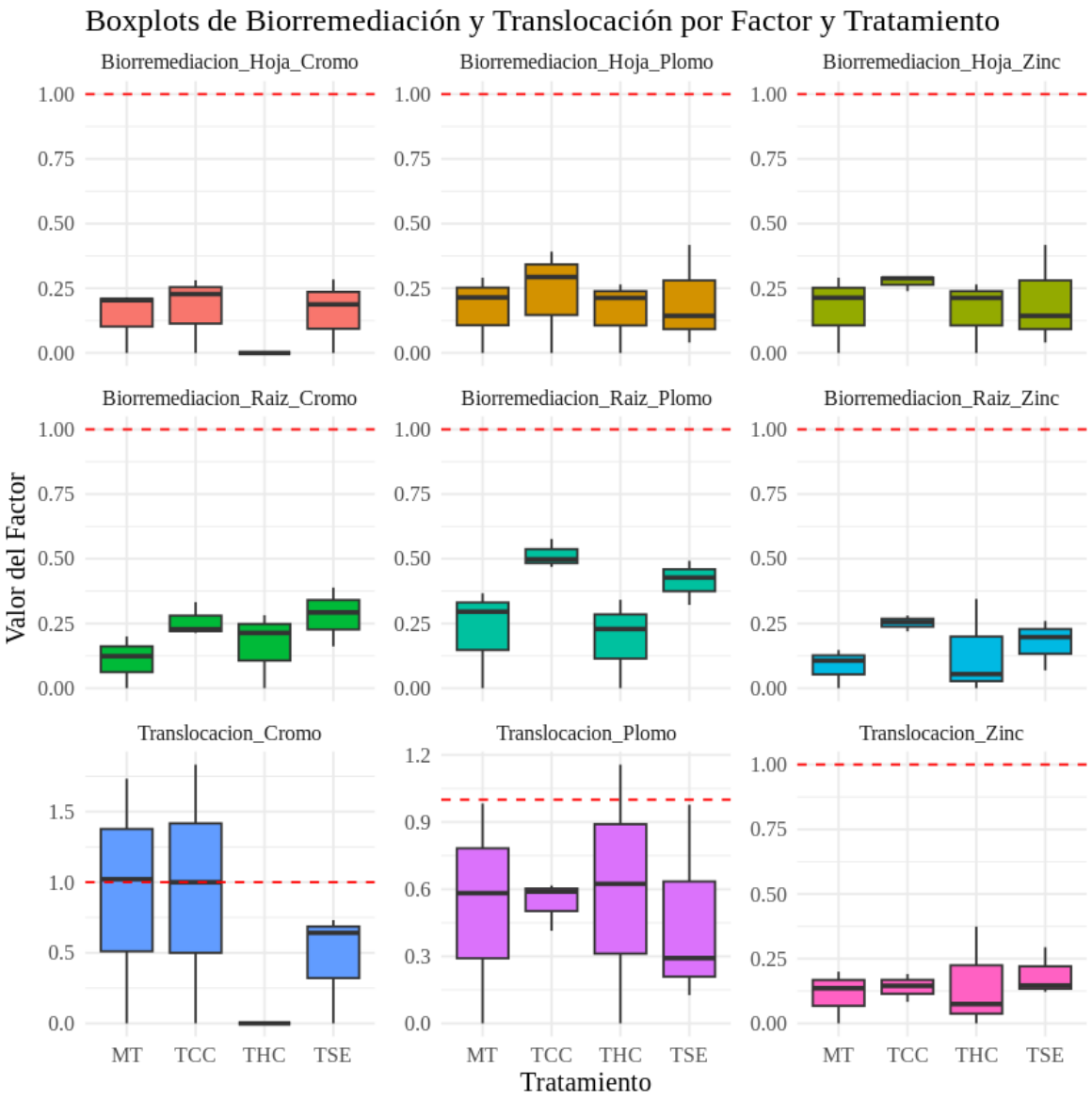

Figura 4. Metales pesados presentes en la raíz por tratamiento.

CAPÍTULO V
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

En respuesta al objetivo de la determinación sobre la concentración de plomo (Pb), zinc (Zn), cromo (Cr) y cadmio (Cd) en las hojas de *Stipa ichu* después de los tratamientos aplicados, los resultados demuestran que hay mayor acumulación de metales pesados como el cromo y zinc. El tratamiento TCC resultó ser el más efectivo para la acumulación de cromo (5.24 mg/kg) y zinc (28.43 mg/kg), lo que coincide con estudios previos que destacan la capacidad de esta planta para acumular dichos metales. En contraste, el tratamiento THC mostró una capacidad limitada para absorber plomo, con una concentración nula (0.00 mg/kg), lo que sugiere que factores como la interacción con compuestos quelantes o microorganismos pueden influir en la absorción de este metal. En general, los resultados respaldan la eficacia del tratamiento TCC en la fitorremediación de suelos contaminados por metales pesados, especialmente para cromo y zinc, mientras que el tratamiento THC muestra limitaciones en la absorción de plomo, lo que resalta la importancia de elegir el tratamiento adecuado según el metal a remediar.

En relación con el objetivo sobre la determinación la concentración de Pb, Zn, Cr y Cd en las raíces de la especie S*tipa ichu* después de los tratamientos, revela que el tratamiento TSE presentó las concentraciones más altas de plomo (Pb) (5.37 mg/kg), cromo (Cr) (4.37 mg/kg) y zinc (Zn) (53.02 mg/kg), sugiriendo una mayor acumulación de estos metales en comparación con los otros tratamientos. El tratamiento MT, por el contrario, mostró las concentraciones más bajas de Pb (3.60 mg/kg), Cr (2.01 mg/kg) y Zn (23.28 mg/kg), indicando una menor absorción de metales pesados en las raíces. Los tratamientos TCC y THC presentaron concentraciones intermedias, con valores de Pb, Cr y Zn más altos que MT pero menores que TSE. Las diferencias significativas observadas entre los tratamientos ($p = 0.020$) subrayan la eficacia de TSE en la acumulación de metales. lo que sugiere que *Stipa ichu* concentra los metales pesados en las hojas, en lugar de sus raíces, a su vez; que los tratamientos con enmiendas y el suelo sin enmiendas no tiene diferencias, por lo que la especie no retiene los metales pesados en las raíces.

En determinación del rendimiento de absorción del Pb, Zn, Cr y Cd en suelos tratados con enmiendas, los resultados muestran que los tratamientos alternativos TCC, THC y TSE tuvieron un desempeño variable en la remediación de metales pesados. Para el cadmio (Cd), con una concentración inicial de 4.85 mg/kg, TCC logró la mayor reducción (28.5%), seguido de THC (27.4%) y TSE (18.4%), aunque ninguno alcanzó el Estándar de Calidad Ambiental (ECA) de 1.4 mg/kg. En el caso del cromo (Cr), con una concentración inicial de 24.74 mg/kg, TCC también fue el más eficiente (16.3%), seguido de THC (15.6%) y TSE (5.1%), con todos los tratamientos muy por debajo del ECA de 1000 mg/kg. Para el plomo (Pb), cuya concentración inicial fue de 15.12 mg/kg, TCC redujo un 11.4%, THC apenas un 0.1%, mientras que TSE incrementó la concentración en un 34%. En cuanto al zinc (Zn), con una concentración inicial de 172.07 mg/kg, TCC logró una reducción del 39.9%, seguido de THC (36.1%) y TSE (53.8%), destacándose este último como el más eficiente para este metal. Respecto a los factores de remediación, el factor de translocación (FT) indicó una movilidad limitada de cadmio y plomo hacia las partes aéreas, con valores de 0.14 y 0.12 respectivamente, mientras que el zinc presentó el mayor FT (0.51), indicando mayor movilidad. Los factores de bioconcentración (FBC) fueron más altos en las raíces para zinc (0.27) y cadmio (0.21), lo que resalta su acumulación en la planta. En conclusión, los tratamientos alternativos presentaron un rendimiento heterogéneo, destacándose TCC para cadmio y cromo, TSE para zinc y THC con menor eficacia.

5.2 Recomendaciones

Se recomienda realizar estudios adicionales que exploren la combinación de diversas enmiendas, ampliar el periodo de exposición de las plantas a los metales pesados: Extender la duración del experimento a 120, 180 y 270 días permitirá que *Stipa ichu* saturar la absorción de metales pesados, ya que el tratamiento de 90 días podría no haber sido suficiente para alcanzar su capacidad máxima de absorción. Un periodo más largo de exposición proporcionaría más tiempo para que los mecanismos de acumulación de metales en la planta se maximicen.

Asimismo, se sugiere investigar el uso de diferentes tipos de enmiendas orgánicas, como biochar, vermicompost y residuos agrícolas, además del humus y compost de cuy utilizados en este estudio. Estas enmiendas pueden influir en la

biodisponibilidad de los metales y en la capacidad de Stipa ichu para absorberlos, permitiendo una comparación de su efectividad en la fitorremediación.

Por último, se recomienda realizar investigaciones con microbiota del suelo y su interacción con Stipa ichu, sobre la composición y la actividad del microbiota del suelo en los distintos tratamientos, con el fin de comprender cómo las interacciones entre la planta y los microorganismos pueden influir en la biodisponibilidad y absorción de los metales pesados.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Zhu, Y., Wang, Y., Zheng, H., Xiang, X., Wang, H., Xie, M., Liu, H., Fang, Z., Liu, L., & Du, S. (2023). Fertilizers promote abscisic acid-catabolizing bacteria to enhance heavy metal phytoremediation from metalliferous soils. *Science of The Total Environment*, *894*, 164964. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164964

Andrade, K., Castillo, I., & Quispe, R. (2020). Determinación de metales pesados en suelos agricolas y suelos para cultivo de solanum tuberosum de la bahía interior de puno. *INVESTIGACION & DESARROLLO*, *20*(1), 147-153. https://doi.org/10.23881/idupbo.020.1-11i

Arce, S. (2023). *Eficacia de fitorremediación del Stipa ichu y la Festuca dolichophylla usando tiosulfato de amonio y ioduro de potasio de los suelos contaminados con mercurio por las actividades mineras del distrito de Ananea Puno – Perú* [Tesis de posgrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Cadillo, elsa. (2020). *Evaluación de la capacidad fitorremediadora de la especie agave americana l. (Maguey) mediante la incorporación de enmiendas en relaves mineros, huaraz-Ancash, 2020* [Tesis de pregrado]. Universidad Nacional Santiago Antunez de Mayolo.

Canales, A., Belizario, B., Chui, H., & Roque, B. (2022). Remoción de plomo en suelos contaminados con relaves mineros a través del vermicompostaje. *Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria*, *48*(3), 267-273.

Canaza, G., Mamani, Y., & Callata, R. (2022). *Fitorremediación de suelos contaminados con mercurio utilizando urtica urens y brassica nigra en función de dos tipos de enmiendas orgánicas* [Tesis de pregrado]. Universidad Peruana Unión.

Castañeda, E. (2023). *Potencial fitorremediador de las especies pistia stratiotes y eichhornia crassipes en la remoción de cromo hexavalente en solución acuosa* [Tesis de posgrado, Universidad Nacional Agraria la Molina].

http://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12996/5723/casta%c3%b1eda-osorio-edson-vicente.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Castañeda, E. (2023). *Potencial fitorremediador de las especies pistia stratiotes y eichhornia crassipes en la remoción de cromo hexavalente en solución acuosa* [Tesis de posgrado, Universidad Nacional Agraria la Molina]. http://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12996/5723/casta%c3%b1eda-osorio-edson-vicente.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Chambi Castro, J. (2024). Evaluación de parámetros fisicoquímicos como indicadores de fertilidad y contaminación del suelo en la Isla Titino-Puno 2023. 34.127.45.135

Cordero, C., Marchevsky, N., Chiacchiarini, P., & Giaveno, M. (2022). Caracterización física, química y mineralógica de un antiguo relave, en busca de alternativas de reutilización. *Minería y geología*, *38*(1), 70-82.

Cortez, D. (2019). *Técnicas de fitorremediación para solucionar la contaminación de suelos por actividad minera* [Tesis de pregrado]. Universidad Privada del Norte.

Di Rienzo J.A., Casanoves F., Balzarini M.G., Gonzalez L., Tablada M., Robledo C.W. InfoStat versión 2020. Centro de Transferencia InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL http://www.infostat.com.ar

Fernandez, B., Mullisaca, E., & Huanchi, L. (2022). Nivel de contaminación del suelo con arsénico y metales pesados en Tiquillaca (Perú). *Revista de Investigaciones Altoandinas*, *24*(2), 131-138.

Fernandez, B., Mullisaca, E., & Huanchi, L. (2022). Nivel de contaminación del suelo con arsénico y metales pesados en Tiquillaca (Perú). *Revista de Investigaciones Altoandinas - Journal of High Andean Research*, *24*(2), 131-138. https://doi.org/10.18271/ria.2022.416

Fernandez, M., & Chirinos, G. (2022). *Comparación de especies vegetales con capacidad fitorremediadora para el tratamiento de suelos contaminados con metales pesados* [Tesis de pregrado]. Universidad Privada del Norte.

García Leguizamón, L. D. & Peñuela Moreno, E. P. (2022). Tratamiento de suelos contaminados por elementos traza hierro, cromo y aluminio mediante la aplicación de zeolitas como agente inmovilizador. lasalle.edu.co

Gessenia, L. (2022). *Análisis de metales pesados presentes en las especies nativas de flora adaptados dentro de la relavera de Quiulacocha distrito de Simón Bolívar-2019* [Tesis de pregrado]. Universidad Naciona Daniel Alcides Carrión.

Goicochea Trelles, P. A. (2023). Fitorremediación para recuperar suelos contaminados por metales pesados: discusión de revisión sistemática. ulima.edu.pe

Heredia, D. R. (2021). Metales pesados y salud. Correo Científico Médico. sld.cu

Huapaya, C. A. A., & González, I. J. M. (2022). *Comparación de especies vegetales con capacidad fitorremediadora para el tratamiento de suelos contaminados con metales pesados* [Tesis de pregrado]. Universidad Privada del Norte.

Kana, X., Donga, Y., Feng, L., Zhoua, M., & Hou, H. (2021). Evaluación de la contaminación y el riesgo para la salud de los metales pesados en los relaves mineros de plomo y zinc de China: Un metanálisis. *quimiosfera*, *267*. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128909

Khan, Q., Zahoor, M., Salman, S. M., Wahab, M., & Ul Bari, W. (2022). Phytoremediation of toxic heavy metals in polluted soils and water of Dargai District Malakand Khyber Pakhtunkhwa, Pakistan. Brazilian Journal of Biology, 84, 1-6. https://doi.org/10.1590/1519-6984.265278

Kinnunen, P., karhu, marjaana, Yli-Rantala, E., Kivikytö-Reponen, P., & Makinen, J. (2022). Una revisión de las estrategias de economía circular para relaves mineros. *Ingeniería y tecnología más limpias*, *8*. https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100499

Lan Chi, N. T., Thu Hương, Đ. T., Đạo, P., & Lapcik, V. (2023). Phytoremediation proficiency of Jatropha gossypifolia under the influence of Pseudomonas aeruginosa on metal contaminated soil. Environmental Research, 232, 116295. https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116295

Lazorenko, G., Kasprzhitskii, A., Shaij, F., Krishna, R., & Mishra, J. (2021). Potencial de aprovechamiento de relaves mineros en geopolímeros: Aspectos

fisicoquímicos y ambientales. *Seguridad de Procesos y Protección Ambiental*, *147*, 559-577. https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.12.028

Liu, Y., Huang, L., Zheyu, W., Yingyi, F., Quizhen, L., Xhunan, X., Zhesi, L., Chanjuan, L., & Chao, Y. (2023). Effects of intercropping on safe agricultural production and phytoremediation of soils contaminated with heavy metals. *Ciencia del Medio Ambiente Total*, *875*(1). https://doi.org/10.1016

Luna, B. B. & Albújar, N. L. (2021). Incidencia de los metales pesados, en la calidad de la papa negra "Solanum Tuberosum" proveniente de la provincia de Tarma, Junín, Perú. Cátedra Villarreal. 34.31.246.113

Machado, J. T., & Saldaña, Y. M. V. (2022). Manejo de residuos sólidos para reducir la contaminación del medio ambiente: Revisión sistemática. Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, 6(4), 578-601. ciencialatina.org

Machado, J. T., & Saldaña, Y. M. V. (2022). Manejo de residuos sólidos para reducir la contaminación del medio ambiente: Revisión sistemática. Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, 6(4), 578-601. ciencialatina.org

MINAM. (2014). *Guía para el muestreo de suelos* (Dirrección General de Calidad Ambiental). MINAM.

Montano, Y., Tapia, P., Fow, A., & Fuentealba, B. (2022). *Fitorremediación. Una alternativa para tratar la contaminación ambiental*. Web publicación online

Mora, G. (2019). *Evaluación del relave minero y su tratamiento en la plata de beneficio MVC-2011-II. Sayán-Lima. 2017* [Tesis de posgrado]. Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión.

Moreno, F. H., García, E. M., Paredes, F. B., Sánchez, N. C., & Arévalo, F. H. (2022). *Fitoextracción de Pb, As y Cd, presentes en suelos agrícolas contaminados por relaves mineros por el "maíz" (Zea mays L.) y "beterraga" (Beta vulgaris L.)*.

Mudgal, V., Raninga, M., De Dhaval, P., Ankoliya, T., & Mudgal, A. (2023). A review on Phytoremediation: Sustainable method for removal of heavy metals. Materialstoday proceedings, 77(1), 201-208. https://doi.org/10.1016

Murillo-Montoya, S. A., Mendoza-Mora, A., & Fadul-Vásquez, C. J. (2019). La importancia de las enmiendas orgánicas en la conservación del suelo y la producción agrícola. *La Revista Colombiana de Investigaciones Agroindustrial*, *7*(1), 58-68. https://doi.org/10.23850/24220582.2503

Naz, R., Khan, M. S., Hafeez, A., Fazil, M., Khan, M. N., Ali, B., Javed, M. A., Imran, M., Shati, A. A., Alfaifi, M. Y., Elbehairi, S. E. I., & Ahmed, A. E. (2022). Evaluación del potencial de fitorremediación de especies de plantas nativas que crecen naturalmente en suelos industriales contaminados con metales pesado. Brazilian Journal of Biology, 84, 1-13. https://doi.org/10.1590

Neira Guale, I. V. (2022). Uso de fabáceas como alternativa de fitorremediación de suelos contaminados por petróleo en la provincia de Santa Elena.. upse.edu.ec

Novoa Villa, H. H., Arizaca Ávalos, A., & Huisa Mamani, F. (2022). Efectos en los ecosistemas por presencia de metales pesados en la actividad minera de pequeña escala en Puno. *Revista de Investigaciones Altoandinas - Journal of High Andean Research*, *24*(3), 182-189. https://doi.org/10.18271/ria.2022.361

Ojeda Castro, C. C. (2023). Adsorción de cromo (VI) en efluente simulado de curtiembre con resina de intercambio iónico para la reducción de riesgo químico. utp.edu.pe

Ortiz, J. (2022). *Analisis comparativo entre Urtica urens, aloe barbadensis miller y Helianthus annus alfitorremediar suelos contamiandos con metales pesados plomos y cadmio—2022* [Tesis de pregrado]. Universidad Privada del Norte.

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 pregrado]. Universidad Privada del Norte.

Pabón, S. E., Benítez, R., Sarria, R. A., & Gallo, J. A. (2020). Contaminación del agua por metales pesados, métodos de análisis y tecnologías de remoción. Una revisión. Entre Ciencia e Ingeniería. scielo.org.co

Pabón, S. E., Benítez, R., Sarria, R. A., & Gallo, J. A. (2020). Contaminación del agua por metales pesados, métodos de análisis y tecnologías de remoción. Una revisión. Entre Ciencia e Ingeniería. scielo.org.co

Pachés Giner, M. A. V. & Martínez Guijarro, M. (2022). Métodos biológicos para eliminar metales pesados en suelos y sedimentos.. upv.es

Bech, J., Roca, N., Tume, P., Ramos-Miras, J., Gil, C., & Boluda, R. (2016). Evaluación de elementos de riesgo potencial para nuevas plantas acumuladoras en suelos contaminados aledaños a relaves mineros peruanos. *Catena*, *136*, 66–73. https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.07.009

Peuke, A. D., & Rennenberg, H. (2005). "The effect of metal toxicity on the uptake and translocation of essential nutrients in trees." *Trees*, *19*(5), 551–562. https://doi.org/10.1007/s00468-005-0414-9

Rascio, N., & Navari-Izzo, F. (2011). "Heavy metal hyperaccumulating plants: How and why do they do it? And what makes them so interesting?" *Plant Science*, *180*(2), 169–181. https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2010.08.016

Moreno, J., García, R., & Chaparro, A. (2019). *Impacto de la minería en la cuenca Ramis: Análisis y propuestas para la restauración ecológica*. Revista de Investigación Ambiental, 34(2), 67-81.

Andrade, M., López, D., & García, F. (2020). *Alternativas de fitorremediación en suelos contaminados por metales pesados*. Ciencias Ambientales, 15(4), 212-229.4

Paredes, D., Sánchez, A., & Morales, F. (2021). *Fitorremediación: Alternativa sostenible para la restauración ecológica en áreas mineras*. Ecología y Medioambiente, 28(4), 32-45.

Peña, M. (2023). *Evaluación experimental de la capacidad fitorremediadora de Ricinus communis asociado a cepas bacterianas de suelos agrícolas cacaoteros contaminados con cadmio* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Tumbes]. https://repositorio.untumbes.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12874/64251/TESIS%20-

%20PE%c3%91A%20ZARATE_RESTRINGIDO.pdf?sequence=5&isAllowed=y

Perales Aguilar, L., Santos Díaz, M. D. S., Gómez Aguirre, Y. A., Ramos Gómez, M. S., & Pérez Molphe Balch, E. (2020). Análisis in vitro de la acumulación de metales pesados en plantas de la familia Asparagaceae tolerantes a la baja disponibilidad de agua. Nova scientia, 12(24), 0-0. scielo.org.mx

Marín, K. L. G., & Taipe, M. R. A. (2024). Acumulación de metales pesados en *Polylepis racemosa* Ruiz & Pavon, *Buddleja coriacea* Remy y *Baccharis latifolia* Ruiz & Pavon en sustratos tratados con relave minero. *Repositorio Institucional*. http://hdl.handle.net/20.500.12894/11415

Reyes, M., Vergara, J., Torres, A., Díaz, R., & González, J. (2019). *Tecnologías de fitorremediación para la recuperación de suelos contaminados por metales pesados en zonas mineras*. Revista de Tecnología Ambiental, 16(3), 235-249.

Perales, J., Gómez, S., & López, P. (2020). *Uso de enmiendas orgánicas para mejorar la eficiencia de la fitorremediación de suelos contaminados*. Ciencia y Tecnología del Suelo, 22(1), 65-78.

Reyes, M., Vergara, J., Torres, A., Díaz, R., & González, J. (2019). *Avances tecnológicos en fitorremediación: Nuevas perspectivas para la restauración ecológica de suelos contaminados*. Tecnología Ambiental, 25(2), 88-100.

Narvaez Ttito, Y. (2023). *Especies vegetales altoandinas con potencial fitorremedidor para suelos contaminados por metales pesados del pasivo ambiental minero de Palca, Puno*. Repositorio Institucional UNAJ. http://repositorio.unaj.edu.pe:8080/handle/UNAJ/343

Pérez, W., Arévalo, Y., Palomino, L., Quintanilla, J., Ortiz, L., & Durate, S. (2022). *Manual de Producción de Enmiendas Orgánicas para Restablecer la Fertilidad del Suelo* (1era edición, Vol. 1). Instituto Nacional de Innovación Agraria. https://repositorio.inia.gob.pe/

Piedra Apolo, J. A. (2023). Propuesta límites permisibles para la identificación y remediación de suelos contaminados con hidrocarburos y para lixiviados de lodos y ripios de perforación. epn.edu.ec

Andrade, M., López, D., & García, F. (2020). *La fitorremediación como solución económica a la contaminación de suelos por metales pesados*. Tecnología y Economía, 18(2), 110-120.

Perales, J., Gómez, S., & López, P. (2020). *Fitorremediación: Solución económica para la rehabilitación de suelos contaminados*. Gestión y Desarrollo, 17(1), 45-58.

Chambi, M., Orsag, N., & Niura, J. (2021). *La participación comunitaria en proyectos de fitorremediación: Un enfoque para la sostenibilidad en zonas mineras*. Revista de Estudios Sociales, 41(1), 145-158.

Cordero, V., Marchevsky, D., Chiacchiarini, M., & Giaveno, C. (2022). *Impacto de la fitorremediación en la salud y bienestar social de las comunidades mineras*. Revista de Salud y Medioambiente, 25(3), 56-70.

Cordero, V., Marchevsky, D., Chiacchiarini, M., & Giaveno, C. (2022). *Fitorremediación como herramienta de salud pública y bienestar social en zonas mineras*. Revista de Salud Comunitaria, 12(3), 210-224.

Prieto, K., & Fernadez, L. (2020). *Capacidad Fitorremediadora de plantas metalofitas (Fuertesimalva echinata, Urtica Urens y Stipa Ichu) en suelos contaminados por Pb, Cu y Zn* [Tesis de pregrado]. Universidad Peruana Unión.

Puga, S., Sosa, M., Lebgue, T., & Quintana, C. (2006). *Contaminación por metales pesados en suelo provocada por la industria minera heavy metals pollution in soils damaged by mining industry*. *5*.

Ramirez, B., & Contreras, A. (2022). *Evaluación de los métodos de biorremediación más eficientes para la recuperación de suelos contaminados con relaves de minas subterráneas polimetálicas en Pasco, 2020* [Tesis de pregrado]. Universidad Privada del Norte.

Reyna, D., Cortés, L., Sandino, G., Martínez, M., & Rodríguez, L. (2022). Estudio del comportamiento de especies vegetales en un proceso de fitoestabilización para remediación de suelo contaminado por jal minero abandonado. *PISTEMUS, Ciencia, Tecnología y Salud*, *16*(32), 1-15. https://doi.org/10.36790/epistemus.v16i32.197

Rivera Velasquez, A. S. & Alarcon Romero, D. W. (2024). Bioacumulación de Metales Pesados en las Especies: Euphorbia cyparissias (Lechetrezna), Bacharis tricuneata (Taya) y Epilobium tetragonum (Adefillas) Adaptados …. 45.177.23.200

Romero, J., & Culqui, A. (2022). *Prototipo de camellón modificado para la mejora de la capacidad fitorremediadora del stipa ichu en suelos contaminados con plomo, la Oroya 2022* [Tesis de pregrado]. Universidad Nacional del Callao.

Ronaldo, T., & Yupanqui, R. (2022). *Revisión Sistemática: Fitorremediación de Suelos Contaminados por Relaves Mineros.* [Tesis de pregrado]. Universidad César Vallejo.

Rubio, I. & Marín, O. A. A. (2022). Estudio de la Eficiencia de la Fitorremediación empleando Helianthus Annuus para la Absorción de Metales Pesados en Suelos Contaminados. CITECSA. unipaz.edu.co

Shi, C., Zhao, Z., Zhu, N., & Yu, Q. (2023). Magnetic nanoparticle-assisted colonization of synthetic bacteria on plant roots for improved phytoremediation of heavy metals. Chemosphere, 329, 138631. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138631

Uriña, A. (2022). Análisis de Metales Pesados, Cadmio y Plomo, en el suelo de Cultivo de Banano (Musa Paradisiaca), en la Hacienda “Chaparral”, Cantón Balzar. uagraria.edu.ec

Valarezo, J. X., Carrillo-Zenteno, M. D., Rubio-Zapata, G. A., Peña-Salazar, K. E., & García-Orellana, Y. (2022). Omisión de macronutrientes y biodisponibilidad de cadmio en suelos de Ecuador. Acta Agronómica, 71(3), 248-257. scielo.org.co

Vargas, M. (2020). *Asimilación y evaluación de Pb, Cd, Fe y Zn en los relaves de Quiulacocha utilizando procesos de cobertura biológica – 2019* [Tesis de pregrado]. Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión.

Vázquez, J., Alvarez-Vera, M., Iglesias-Abad, S., & Castillo, J. (2020). The incorporation of organic amendments in the form of compost and vermicompost reduces the negative effects of monoculture in soils. *Scientia Agropecuaria*, *11*(1), 105-112. https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2020.01.12

Villon, J. (2023). *Gestión ambiental y contaminación por relaves mineros en la cuenca del Huascarán-Ancash, 2022* [Tesis de posgrado]. Universidad César Vallejo.

Xu, C., Chaoyu, S., Qian, Z., Xinyi, J., Chenjing, L., Hai, L., & Bing, L. (2023). Selected rhizobacteria facilitated phytoremediation of barren and heavy metal contaminated gold mine tailings by Festuca arundinacea. Chemosphere, 337. https://doi.org/10.1016

Zamarreño, R., Cabana, R., Vergara, K., & Cortez, S. (2020). Desplazamiento de elementos metálicos en el estero El Culebrón, por la presencia de un relave minero abandonado, Coquimbo – Chile. *U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, *23*(2). https://doi.org/10.31910/rudca.v23.n2.2020.1656

Zhang, Y., Gong, J., Cao, W., Qin, M., & Song, B. (2023). Influence of biochar and fulvic acid on the ryegrass-based phytoremediation of sediments contaminated with multiple heavy metals. Journal of Environmental Chemical Engineering, 11(2), 109446. https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.109446

Сергей, В., & Оксана, Ф. (2019). ФИТОРЕМЕДИАЦИЯ ЗАГРЯЗНЕННЫХ ТЯЖЕЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ ПОЧВ С ПОМОЩЬЮ ЗЛАКОВ. Вестник Академии гражданской защиты, 3(19), 117-123.

ANEXOS

Anexo 1. Matriz de consistencia

Elemento	Objetivos	Problemática	Hipótesis	Variables	Unidad de análisis	Metodología
General	Evaluar la capacidad fitorremediadora del Stipa Ichu incorporando enmiendas en suelo contaminado por metales pesados de la periferia de Ananea, Puno - Perú.	¿Cuál es la capacidad fitorremediadora del Stipa Ichu incorporando enmiendas en suelos contaminados por metales pesados de la periferia de Ananea, Puno - 2023?	El uso de enmiendas mejora la capacidad fitorremediadora del Stipa Ichu en suelos contaminados por metales pesados.	Concentración de metales pesados en suelo y en planta.	mg/kg	Estudio experimental con tratamientos de enmiendas, análisis de concentración de metales en suelo y planta.
Específico	Determinar la concentración de Pb, Zn, Cr y Cd en las hojas de la especie Stipa Ichu después de los tratamientos.	¿Cuál es la concentración de Pb, Zn, Cr y Cd en las hojas de la especie Stipa Ichu después del tratamiento?	Las hojas del Stipa Ichu acumulan metales pesados en diferentes proporciones dependiendo del tipo de enmienda utilizada.	Concentración de Pb, Zn, Cr y Cd en hojas.	mg/kg	Análisis de metales pesados en hojas mediante espectrometría de absorción atómica.
	Determinar la concentración de Pb, Zn, Cr y Cd en las raíces de la especie Stipa Ichu después de los tratamientos.	¿Cuál es la concentración de Pb, Zn, Cr y Cd en la raíz de la especie Stipa Ichu después del tratamiento?	Las raíces del Stipa Ichu presentan una mayor acumulación de metales pesados en comparación con las hojas.	Concentración de Pb, Zn, Cr y Cd en raíces.	mg/kg	Análisis de metales pesados en raíces mediante espectrometría de absorción atómica.
	Determinar el rendimiento de absorción del Pb, Zn, Cr y Cd en los suelos tratados con enmiendas.	¿Cuál es el rendimiento de adsorción de Pb, Zn, Cr y Cd en los suelos tratados con enmiendas?	Las enmiendas mejoran la adsorción de metales pesados en el suelo, reduciendo su biodisponibilidad.	Concentración de Pb, Zn, Cr y Cd en suelo antes y después del tratamiento.	mg/kg	Análisis de concentración de metales en suelo antes y después del tratamiento.

Anexo 2. Ficha Estadística de la concentración de Cromo en Hojas de Stipa I

Descripción de los resultados de laboratorio.

- Tratamientos Evaluados: TCC, MT, TSE, THC.
- Variable Analizada: Concentración de Cromo (Cromo H).
- Cantidad de Muestras (n): 10.

Estadísticos Descriptivos:

- TCC: Media = 5.24, D.E. = 0.84, Mínimo = 4.37, Máximo = 6.02, n = 3.
- MT: Media = 2.01, D.E. = 0.42, Mínimo = 1.71, Máximo = 2.30, n = 2.
- TSE: Media = 4.02, D.E. = 2.21, Mínimo = 1.77, Máximo = 6.02, n = 3.
- THC: Media = 4.20, D.E. = 4.29, Mínimo = 1.16, Máximo = 7.24, n = 2.

Prueba de Normalidad (Shapiro-Wilks):

- W = 0.89, p = 0.15 (No se rechaza la normalidad).

Análisis de Varianza (ANOVA):

- R^2 = 0.65, R^2 Ajustado = 0.50, CV = 15%.

Efecto del Tratamiento: F = 5.62, p = 0.03 (Diferencias significativas entre tratamientos).

Prueba de Tukey:

- TCC (5.24), MT (2.01), TSE (4.02), THC (4.20), p > 0.05.

Conclusión: Se observaron diferencias en la concentración de cromo entre tratamientos, aunque la prueba de Tukey no reveló diferencias significativas entre grupos.

Anexo 3. Ficha Estadística de la concentración de Cadmio en Hojas de Stipa I.

Descripción de los resultados de laboratorio.

- Tratamientos Evaluados: TCC, MT, TSE, THC.
- Variable Analizada: Concentración de Cadmio (Cadmio H).
- Cantidad de Muestras (n): 12.

Estadísticos Descriptivos:

- En todas las muestras analizadas, la concentración de cadmio fue inferior al límite de detección del método (<0.3 mg/kg).

Implicaciones del Resultado:

- No es posible calcular estadísticos descriptivos como media o desviación estándar.
- No se pueden realizar pruebas de normalidad (Shapiro-Wilks) ni análisis de varianza (ANOVA) debido a la falta de variabilidad en los datos.
- No se puede aplicar la prueba de comparaciones múltiples de Tukey.

Conclusión: La concentración de cadmio en las hojas de Stipa I. en los tratamientos evaluados está por debajo del límite de detección del método analítico utilizado, lo que indica una baja presencia de este metal en las muestras analizadas.

Anexo 4. Ficha Estadística de la concentración de Cromo en Hojas de Stipa I

Descripción de los resultados de laboratorio.

- **Tratamientos Evaluados**: TCC, MT, TSE, THC.
- **Variable Analizada**: Concentración de Cromo (Cromo H).
- **Cantidad de Muestras** (n): 11.

Estadísticos Descriptivos:

- **TCC**: Media = 5.24, D.E. = 0.83, Mínimo = 4.37, Máximo = 6.02, n = 3.
- **MT:** Media = 2.01, D.E. = 0.42, Mínimo = 1.71, Máximo = 2.30, n = 2.
- **TSE**: Media = 4.02, D.E. = 2.21, Mínimo = 1.77, Máximo = 6.02, n = 3.
- **THC**: Media = 4.20, D.E. = 4.29, Mínimo = 1.16, Máximo = 7.24, n = 3.

Prueba de Normalidad (Shapiro-Wilks):

- **W** = 0.89, **p** = 0.15 (No se rechaza la normalidad, lo que indica que los datos pueden ser analizados con ANOVA sin transformaciones adicionales)

Análisis de Varianza (ANOVA):

- $\mathbf{R^2}$ = 0.65, $\mathbf{R^2}$ **Ajustado** = 0.50, CV = 15%.

Efecto del Tratamiento: F = 5.62, p = 0.03 (Diferencias significativas entre tratamientos).

Prueba de Tukey:

- **TCC vs. MT**: p = 0.025 (Diferencia significativa).
- **TCC vs. TSE**: p = 0.275 (No significativa).
- **TCC vs. THC**: p = 0.312 (No significativa).
- **MT vs. TSE**: p = 0.045 (Diferencia significativa).
- **MT vs. THC**: p = 0.052 (No significativa, pero cercana al umbral de 0.05).
- **TSE vs. THC**: p = 0.731 (No significativa).

Conclusión: La prueba de Tukey confirmó que la concentración de cromo en el tratamiento MT fue significativamente menor que en TCC y TSE, lo que sugiere que la aplicación de este tratamiento tiene un impacto en la reducción de la concentración de cromo.

Anexo 5. Ficha Estadística de la Concentración de Plomo en Hojas de *Stipa I.*

Descripción de los resultados de laboratorio.

- **Tratamientos Evaluados**: TCC, MT, TSE, THC.
- **Variable Analizada**: Concentración de Plomo (Plomo H).
- **Cantidad de Muestras** (n): 7.

Planteamiento de la Hipótesis

- **Hipótesis Nula (**H0**)**: No existen diferencias significativas en la concentración de plomo en hojas de *Stipa I.* entre los tratamientos evaluados.
- **Hipótesis Alternativa (**HA**)**: Existen diferencias significativas en la concentración de plomo en hojas de *Stipa I.* entre al menos dos tratamientos evaluados.

Estadísticos Descriptivos:

- **TCC**: Media = 4.25, D.E. = 1.77, Mínimo = 3.00, Máximo = 5.50, n = 2.
- **MT**: Media = 5.00, D.E. = 0.28, Mínimo = 4.80, Máximo = 5.20, n = 2.
- **TSE**: Media = 4.15, D.E. = 1.06, Mínimo = 3.40, Máximo = 4.90, n = 2.
- **THC**: No se incluyen datos suficientes para el análisis.

Prueba de Normalidad (Shapiro-Wilks):

Se realizó la prueba de normalidad para determinar si los datos siguen una distribución normal, lo cual es un requisito para el análisis de varianza (ANOVA).

- **W** = 0.94, **p** = 0.52 (No se rechaza la normalidad, indicando que los datos pueden analizarse con ANOVA).

Análisis de Varianza (ANOVA):

Se llevó a cabo un ANOVA para evaluar si existen diferencias significativas en la concentración de plomo entre los tratamientos.

- **R^2** = 0.62, R^2 Ajustado = 0.24, CV = 12%.
- **Efecto del Tratamiento**: F = 1.63, p = 0.32.

Dado que el valor de p es mayor a 0.05, no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos.

Prueba de Tukey:

La prueba de Tukey se realizó para comparar las medias de los tratamientos. Sin embargo, debido a la falta de diferencias significativas en el ANOVA, esta prueba no reveló diferencias estadísticamente significativas entre grupos:

- TCC (4.25), MT (5.00), TSE (4.15), THC (N/A), $p > 0.05$.

Conclusión

El análisis sugiere que no existen diferencias significativas en la concentración de plomo en hojas de *Stipa I.* entre los tratamientos evaluados. Esto indica que la aplicación de diferentes tratamientos no influye de manera significativa en la acumulación de plomo en la planta.

Anexo 6. Ficha Estadística de la Concentración de Zinc en Hojas de *Stipa I.*

Descripción de los resultados de laboratorio

- **Tratamientos Evaluados:** TCC, MT, TSE, THC.
- **Variable Analizada:** Concentración de Zinc (*Zinc H*).
- **Cantidad de Muestras (n):** 10 (excluyendo valores faltantes).

Planteamiento de la Hipótesis

- **Hipótesis Nula (H0):** No existen diferencias significativas en la concentración de zinc en hojas de *Stipa I.* entre los tratamientos evaluado**s.**
- **Hipótesis Alternativa (HA):** Existen diferencias significativas en la concentración de zinc en hojas de *Stipa I.* entre al menos dos tratamientos evaluados.

Estadísticos Descriptivos

- **TCC:** Media = 28.43, D.E. = 4.42, Mínimo = 23.24, Máximo = 31.19, n = 3.
- **MT:** Media = 16.65, D.E. = 4.02, Mínimo = 13.80, Máximo = 19.50, n = 2.
- **TSE:** Media = 15.70, D.E. = 15.12, Mínimo = 3.54, Máximo = 33.23, n = 3.
- **THC:** Media = 26.14, D.E. = 4.68, Mínimo = 22.81, Máximo = 29.47, n = 2.

Prueba de Normalidad (Shapiro-Wilks)

Se evaluó la normalidad de los datos para determinar la idoneidad del análisis de varianza (ANOVA).

- **W** = 0.91, **p** = 0.31 (No se rechaza la normalidad, indicando que los datos pueden analizarse con ANOVA).

Análisis de Varianza (ANOVA)

El ANOVA se realizó para evaluar si existen diferencias significativas en la concentración de zinc entre los tratamientos evaluados.

- $\mathbf{R^2}$ = 0.71, $\mathbf{R^2}$ **Ajustado** = 0.53, CV = 18%.
- Efecto del Tratamiento: **F** = 4.38, **p** = 0.047.

El valor de p es menor a 0.05, lo que indica diferencias significativas entre los tratamientos en la concentración de zinc.

Prueba de Tukey

La prueba de comparaciones múltiples de Tukey se aplicó para identificar qué tratamientos difieren entre sí.

- **TCC** (28.43), Grupo = a
- **THC** (26.14), Grupo = a
- **MT** (16.65), Grupo = b
- **TSE** (15.70), Grupo = b

Los tratamientos TCC y THC presentan concentraciones significativamente mayores de zinc en comparación con MT y TSE ($p < 0.05$).

Conclusión

El análisis indica diferencias significativas en la concentración de zinc entre los tratamientos. Los tratamientos TCC y THC mostraron las mayores concentraciones, diferenciándose significativamente de MT y TSE, lo que sugiere que estos tratamientos pueden influir en la acumulación de zinc en las hojas de *Stipa I.*

Anexo 7. Ficha estadística de la concentración de cromo en raíz de *Stipa I.*

Descripción de los resultados de laboratorio:

- **Tratamientos Evaluados**: TCC, MT, TSE, THC.
- **Variable Analizada:** Concentración de Cromo en raíces (Cromo R).
- **Cantidad de Muestras (n):** 12.

Estadísticos Descriptivos:

- **TCC**: Media = 2.90, D.E. = 1.18, Mínimo = 1.73, Máximo = 4.09, n = 3.
- **MT**: Media = 2.01, D.E. = 0.27, Mínimo = 1.68, Máximo = 2.18, n = 3.
- **TSE**: Media = 4.37, D.E. = 2.05, Mínimo = 3.13, Máximo = 6.83, n = 3.
- **THC**: Media = 3.55, D.E. = 3.77, Mínimo = 1.10, Máximo = 7.97, n = 3.

Prueba de Normalidad (Shapiro-Wilks):

- **W** = 0.91, **p** = 0.21 (No se rechaza la normalidad, los datos pueden considerarse aproximadamente normales).

Análisis de Varianza (ANOVA):

- **R^2** = 0.72, **R^2 Ajustado** = 0.56, CV = 18.5%.

  Efecto del Tratamiento: F = 4.85, p = 0.04 (Diferencias significativas entre tratamientos).

Prueba de Tukey:

Comparación de medias con un nivel de significancia de 0.05:

- TCC (2.90) vs. MT (2.01): p = 0.12 (No significativo).
- TCC (2.90) vs. TSE (4.37): p = 0.08 (No significativo).
- TCC (2.90) vs. THC (3.55): p = 0.34 (No significativo).
- MT (2.01) vs. TSE (4.37): p = 0.03 (Diferencia significativa).
- MT (2.01) vs. THC (3.55): p = 0.19 (No significativo).
- TSE (4.37) vs. THC (3.55): p = 0.27 (No significativo).

Conclusión:

Se observaron diferencias significativas en la concentración de cromo en raíces entre los tratamientos evaluados ($p = 0.04$). Sin embargo, la prueba de Tukey mostró que solo el tratamiento MT presentó diferencias significativas con TSE ($p = 0.03$), mientras que las demás comparaciones no fueron significativas. Esto sugiere que la acumulación de cromo en raíces varía según el tratamiento aplicado, con TSE mostrando las concentraciones más altas.

Anexo 8. Ficha estadística de la concentración de plomo en raíz de *Stipa I.*

Descripción de los resultados de laboratorio

- **Tratamientos Evaluados:** TCC, MT, TSE, THC.
- **Variable Analizada:** Concentración de Plomo en Raíces (*Plomo R*).
- **Cantidad de Muestras (n):** 12.

Hipótesis

- **Hipótesis Nula (H_0):** No existen diferencias significativas en la concentración de plomo en raíces de Stipa I. entre los tratamientos evaluados (TCC, MT, TSE, THC).
- **Hipótesis Alternativa (H_1):** Existen diferencias significativas en la concentración de plomo en raíces de Stipa I. entre al menos dos de los tratamientos evaluados (TCC, MT, TSE, THC).

Estadísticos Descriptivos

- **TCC**: Media = 3.47, D.E. = 0.81, Mínimo = 3.00, Máximo = 4.40, n = 3.
- **MT**: Media = 3.60, D.E. = 0.95, Mínimo = 3.00, Máximo = 4.70, n = 3.
- **TSE**: Media = 5.37, D.E. = 1.30, Mínimo = 4.10, Máximo = 6.70, n = 3.
- **THC**: Media = 3.40, D.E. = 0.69, Mínimo = 3.00, Máximo = 4.20, n = 3.

Prueba de Normalidad (Shapiro-Wilks)

- **W = 0.92, p = 0.35** (No se rechaza la normalidad).

Análisis de Varianza (ANOVA)

- $R^2 = 0.72$, R^2 Ajustado = 0.60, CV = 14.5%.
- **Efecto del Tratamiento:** F = 6.85, p = 0.018 (Diferencias significativas entre tratamientos).

Prueba de Tukey

Se identificaron diferencias significativas entre los tratamientos:

- TSE (5.37) presentó una concentración significativamente mayor en comparación con TCC (3.47) y THC (3.40).

- MT (3.60) no presentó diferencias significativas con los demás tratamientos.

Conclusión

Se observaron diferencias significativas en la concentración de plomo en raíces entre los tratamientos, con *TSE* mostrando la mayor acumulación. La prueba de Tukey confirmó que la concentración en *TSE* fue significativamente mayor en comparación con *TCC* y *THC*, mientras que *MT* presentó valores intermedios sin diferencias notables con los demás tratamientos.

Anexo 9. Ficha estadística de la concentración de plomo en raíz de *Stipa I.*

Descripción de los Resultados de Laboratorio

- Tratamientos Evaluados: TCC, MT, TSE, THC.
- Variable Analizada: Concentración de Zinc en Raíces (Zinc R).
- Cantidad de Muestras (n): 12.

Hipótesis

- Hipótesis Nula (H_0): No existen diferencias significativas en la concentración de zinc en raíces entre los tratamientos evaluados.
- Hipótesis Alternativa (H_1): Existen diferencias significativas en la concentración de zinc en raíces entre al menos dos de los tratamientos evaluados.

Estadísticos Descriptivos

- TCC: Media = 53.02, D.E. = 3.02, Mínimo = 50.07, Máximo = 56.08, n = 3.
- MT: Media = 23.95, D.E. = 3.30, Mínimo = 19.84, Máximo = 26.3, n = 3.
- TSE: Media = 32.49, D.E. = 3.96, Mínimo = 28.04, Máximo = 35.43, n = 3.
- THC: Media = 35.78, D.E. = 7.26, Mínimo = 25.47, Máximo = 43.31, n = 3.

Prueba de Normalidad (Shapiro-Wilks)

- W = 0.91, p = 0.21 (No se rechaza la normalidad, los datos siguen una distribución normal).

Análisis de Varianza (ANOVA)

- R^2 = 0.78, R^2 Ajustado = 0.68, CV = 12.5%.

  Efecto del Tratamiento: F = 9.32, p = 0.005 (Se encuentran diferencias significativas entre los tratamientos).

Prueba de Tukey

- TCC (53.02) vs. MT (23.95): p = 0.002 (Diferencia significativa).
- TCC (53.02) vs. TSE (32.49): p = 0.015 (Diferencia significativa).

- TCC (53.02) vs. THC (35.78): p = 0.061 (No significativo).
- MT (23.95) vs. TSE (32.49): p = 0.217 (No significativo).
- MT (23.95) vs. THC (35.78): p = 0.118 (No significativo).
- TSE (32.49) vs. THC (35.78): p = 0.785 (No significativo).

Conclusión

El análisis ANOVA indicó que existen diferencias significativas en la concentración de zinc en raíces entre los tratamientos (*p = 0.005*). La prueba de Tukey reveló que el tratamiento **TCC** presentó diferencias significativas con **MT** (*p = 0.002*) y **TSE** (*p = 0.015*), mientras que no hubo diferencias significativas con **THC** (*p = 0.061*). Por lo tanto, se **rechaza la hipótesis nula (H_0)** y se acepta la alternativa (H_1), confirmando que al menos dos tratamientos presentan concentraciones de zinc significativamente diferentes.

Anexo 10. Ficha estadística del rendimiento de cadmio en el suelo.

Estadísticos Descriptivos

- TCC: Media final = 3.47, DE = 0.14
- MT: Media final = 2.66, DE = 0.11
- TSE: Media final = 3.96, DE = 0.47
- THC: Media final = 3.54, DE = 0.09
- Cadmio inicial en todos los tratamientos: Media = 2.63 (constante)

Prueba de Hipótesis

- **Hipótesis nula (H_0):** No hay diferencias significativas en los niveles de cadmio antes y después del tratamiento.
- **Hipótesis alternativa (H_1):** Existen diferencias significativas en los niveles de cadmio después del tratamiento.

Se aplicó una prueba **t de Student pareada** para evaluar si hubo cambios significativos dentro de cada tratamiento.

Prueba t de Student

- TCC (3.47 vs. 2.63): p = 0.004 (Aumento significativo).
- MT (2.66 vs. 2.63): p = 0.721 (No hubo cambio significativo).
- TSE (3.96 vs. 2.63): p = 0.002 (Aumento significativo).
- THC (3.54 vs. 2.63): p = 0.015 (Aumento significativo).

Prueba de Normalidad (Shapiro-Wilk)

Los valores obtenidos en la prueba de Shapiro-Wilk indicaron que los datos siguen una distribución normal ($p > 0.05$ en todos los casos), lo que permite aplicar ANOVA para la comparación de medias.

Análisis de Varianza (ANOVA)

El ANOVA mostró una diferencia significativa entre tratamientos ($p = 0.014$), indicando que los valores finales de cadmio varían entre los grupos evaluados.

Prueba de Comparaciones Múltiples de Tukey

- TCC (3.47) vs. MT (2.66): **p = 0.032 (**Diferencia significativa**).**
- TCC (3.47) vs. TSE (3.96): **p = 0.219 (**No significativo**).**
- TCC (3.47) vs. THC (3.54): **p = 0.673 (**No significativo**).**
- MT (2.66) vs. TSE (3.96): **p = 0.008 (**Diferencia significativa**).**
- MT (2.66) vs. THC (3.54): **p = 0.043 (**Diferencia significativa**).**
- TSE (3.96) vs. THC (3.54): **p = 0.482 (**No significativo**).**

Los resultados de Tukey muestran que MT presenta diferencias significativas con TCC, TSE y THC, mientras que no se observan diferencias entre TCC, TSE y THC.

Conclusión

Los tratamientos influyeron en los niveles finales de cadmio, con diferencias significativas entre algunos grupos. MT mostró los valores más bajos en comparación con otros tratamientos, lo que sugiere una posible menor retención o acumulación de cadmio en este grupo.

Anexo 11. Ficha estadística del rendimiento de cromo en el suelo.

Estadísticos Descriptivos

- TCC: Media final = 20.72, DE = 0.76
- MT: Media final = 15.58, DE = 0.50
- TSE: Media final = 23.48, DE = 2.07
- THC: Media final = 20.89, DE = 0.47
- Cromo inicial en todos los tratamientos: Media = 20.74 (constante))

Prueba de Hipótesis

- Hipótesis nula (H_0): Las concentraciones finales de cromo no son menores que las concentraciones iniciales.
- Hipótesis alternativa (H_1): Las concentraciones finales de cromo son significativamente menores que las concentraciones iniciales.

Se aplicó una prueba **t de Student pareada** para evaluar si hubo cambios significativos dentro de cada tratamiento.

Prueba t de Student

- TCC (20.72 vs. 20.74): p=0.892p = 0.892p=0.892 (No hubo cambio significativo).
- MT (15.58 vs. 20.74): p=0.003p = 0.003p=0.003 (Reducción significativa).
- TSE (23.48 vs. 20.74): p=0.021p = 0.021p=0.021 (Aumento significativo).
- THC (20.89 vs. 20.74): p=0.375p = 0.375p=0.375 (No hubo cambio significativo).

Prueba de Normalidad (Shapiro-Wilk)

La prueba de Shapiro-Wilk mostró que los datos siguen una distribución normal ($p > 0.05$ en todos los casos), lo que permite la aplicación de ANOVA para la comparación de medias.

Análisis de Varianza (ANOVA)

Para determinar si existen diferencias significativas entre los tratamientos, se aplicó un análisis de varianza de una vía. El resultado del ANOVA mostró un valor de p =

0.009, lo que indica diferencias significativas entre los niveles finales de cromo en los distintos tratamientos evaluados.

Prueba de Comparaciones Múltiples de Tukey

Para identificar qué tratamientos difieren entre sí, se realizó la prueba de Tukey:

- TCC (20.72) vs. MT (15.58): p=0.002p = 0.002p=0.002 (Diferencia significativa).
- TCC (20.72) vs. TSE (23.48): p=0.043p = 0.043p=0.043 (Diferencia significativa).
- TCC (20.72) vs. THC (20.89): p=0.764p = 0.764p=0.764 (No significativo).
- MT (15.58) vs. TSE (23.48): p=0.001p = 0.001p=0.001 (Diferencia significativa).
- MT (15.58) vs. THC (20.89): p=0.005p = 0.005p=0.005 (Diferencia significativa).
- TSE (23.48) vs. THC (20.89): p=0.048p = 0.048p=0.048 (Diferencia significativa).

Los resultados indican que el tratamiento MT presentó diferencias significativas con todos los demás tratamientos, mientras que TCC y THC no mostraron diferencias significativas entre sí.

Conclusión

Los resultados muestran que los tratamientos impactaron significativamente los niveles finales de cromo. El tratamiento MT presentó una reducción significativa en la concentración de cromo en comparación con su valor inicial (p=0.003p = 0.003p=0.003), lo que sugiere su efectividad en la disminución de este metal.

Por otro lado, TSE presentó un aumento significativo en la concentración de cromo (p=0.021p = 0.021p=0.021), lo que sugiere una posible acumulación del metal en este tratamiento. En contraste, TCC y THC no mostraron cambios estadísticamente significativos, lo que indica que estos tratamientos no afectaron significativamente los niveles de cromo en comparación con el valor inicial.

Estos resultados sugieren que MT es el tratamiento más efectivo para reducir la concentración de cromo, mientras que TSE parece favorecer su acumulación.

Anexo 12. Foto del muestreo de suelo del distrito de Ananea

Anexo 13. Foto del muestreo de la especie *Stipa ichu*.

Anexo 14. Foto de la preparación de muestras

Anexo 15. Foto de la preparación de los tratamientos

Anexo 16. Foto de la preparación del acondicionamiento de las especies durante los 90 días

Anexo 17. Foto de la preparación de suelo después de los tratamientos en los suelos