

UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental



**Fitorremediación de suelo contaminado por relave minero con
presencia de plomo mediante *Stipa ichu* con enmiendas**

Tesis para obtener el Título Profesional de Ingeniero Ambiental

Autores:

Liz Karol Mayhuiri Chinchiercoma

Katia Malu Quispe Colque

Asesor:

Dr. Jorge Juvenal Bravo Hualla

Juliaca, diciembre de 2025

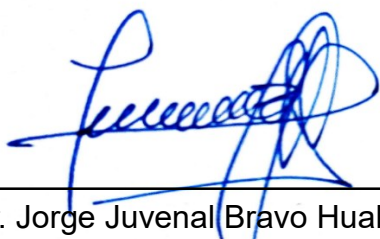
DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD DE TESIS

Yo Dr. Jorge Juvenal Bravo Hualla, docente de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, de la Universidad Peruana Unión.

DECLARO:

Que la presente investigación titulada: **“FITORREMEDIACIÓN DE SUELO CONTAMINADO POR RELAVE MINERO CON PRESENCIA DE PLOMO MEDIANTE STIPA ICHU CON ENMIENDAS”** de los autores **Liz Karol Mayhuiri Chinchercoma** y **Katia Malu Quispe Colque** tiene un índice de similitud de 17% verificable en el informe del programa Turnitin, y fue realizada en la Universidad Peruana Unión bajo mi dirección.

En tal sentido asumo la responsabilidad que corresponde ante cualquier falsedad u omisión de los documentos como de la información aportada, firmo la presente declaración en la ciudad de Juliaca, a los 29 días del mes de diciembre del año 2025.



Dr. Jorge Juvenal Bravo Hualla

Asesor

INDICE

ABSTRACK	5
RESUMEN	5
1 INTRODUCCION	7
2 MATERIALES Y MÉTODOS	9
2.1 Lugar en estudio.....	9
2.2 Caracterizar el suelo contaminado por relave.....	10
2.3 Procedimiento experimental	10
2.4 Recolección de la especie <i>Stipa Ichu</i>	11
2.5 Construcción de las unidades experimentales.....	12
2.6 Determinación de la concentración del Plomo.....	12
2.7 Determinación del factor de bioacumulación de la especie <i>Stipa Ichu</i>	13
2.8 Determinación de la eficiencia de remoción del plomo	14
2.9 Diseño estadístico	14
3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	15
3.1 Concentración testigo de Plomo y propiedades fisicoquímicas del relave y la especie <i>Stipa ichu</i>	15
3.2 Influencia de los sustratos en la fitorremediación de plomo.....	17
3.3 Cantidad de Plomo absorbido por la especie <i>Stipa ichu</i>	19
3.4 Factor de Bioacumulación	21
3.5 Eficiencia de remoción del plomo empleando la especie <i>Stipa Ichu</i>	22
4 CONCLUSIONES	29
5 REFERENCIAS	30

INDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.	9
FIGURA 2 DISMINUCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE PLOMO EN EL SUSTRATO POR TRATAMIENTO. 18	
FIGURA 3 CONCENTRACIÓN DE PLOMO ABSORBIDO POR LA RAÍZ DE LA ESPECIE STIPA ICHU.	19
FIGURA 4 CONCENTRACIÓN DE PLOMO ABSORBIDO POR EL TALLO DE LA ESPECIE STIPA ICHU.	20
FIGURA 5 EFICIENCIA DE BIOACUMULACIÓN DE PLOMO (Pb) POR TRATAMIENTO CON STIPA ICHU.	23

INDICE DE TABLAS

TABLA 1 TRATAMIENTOS EXPERIMENTALES	11
TABLA 2 FACTOR DE BIOACUMULACIÓN DE LA PLANTA.	14
TABLA 3 CONCENTRACIÓN DE PLOMO Y PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DEL RELAVE Y LA PLANTA.	15
TABLA 4 CONCENTRACIÓN DE PLOMO EN EL SUSTRATO CORRESPONDIENTE A CADA UNIDAD EXPERIMENTAL.....	17
TABLA 5 FACTOR DE BIOACUMULACIÓN DE STIPA ICHU A LOS 90 DÍAS.	21
TABLA 6 ANÁLISIS DE VARIANZA (ANOVA) PARA LA REMOCIÓN DEL PLOMO EN LOS SUSTRATOS DE LOS TRATAMIENTOS.....	24
TABLA 7 PRUEBA DE TUKEY PARA LA REMOCIÓN DEL PLOMO EN LOS SUSTRATOS DE LOS TRATAMIENTOS.....	24
TABLA 8 ANÁLISIS DE VARIANZA (ANOVA) PARA LA BIOACUMULACIÓN DEL PLOMO EN LA RAÍZ DE LA ESPECIE STIPA ICHU.	26
TABLA 9 PRUEBA DE TUKEY PARA LA BIOACUMULACIÓN DEL PLOMO EN LA RAÍZ DE LA ESPECIE STIPA ICHU.....	26
TABLA 10 ANÁLISIS DE VARIANZA (ANOVA) PARA LA BIOACUMULACIÓN DEL PLOMO EN EL TALLO DE LA ESPECIE STIPA ICHU.	27
TABLA 11 PRUEBA DE TUKEY PARA LA BIOACUMULACIÓN DEL PLOMO EN EL TALLO DE LA ESPECIE STIPA ICHU.....	28

Fitorremediación de suelo contaminado por relave minero con presencia de plomo mediante *Stipa ichu* con enmiendas

Phytoremediation of soil contaminated by mining tailings containing lead using *Stipa ichu* with amendments

RESUMEN

El presente estudio tuvo por objetivo evaluar la remediación de suelos contaminados por relaves mineros con contenido de plomo mediante la especie *Stipa ichu* con enmiendas, a razón de que los suelos altoandinos están contaminados producto de las actividades mineras informales que generan la contaminación por metales pesados como el Pb, Hg, As. En la metodología se experimentó con 5 tratamientos, seguidamente se cuantificó la concentración del plomo acumulado por la especie *Stipa ichu* para determinar el factor de bioacumulación. En los resultados, los análisis indicaron que la especie *Stipa ichu* acumuló preferentemente el plomo en la raíz con 21.91mg/kg al día 45, 25.47mg/kg al día 70 y 32.86 mg/kg al día 90, con menores concentraciones en la parte aérea con 3.78mg/kg al día 45, 3.26mg/kg al día 70 y 4.88 mg/kg al día 90; además respecto a la influencia de los sustratos en la fitorremediación, se evidenció que aquellos con mayor contenido orgánico y propiedades fisicoquímicas (pH, conductividad eléctrica y materia orgánica) en el T4 y T5 promovieron una mayor disminución de pb en el suelo, alcanzando eficiencias de remoción hasta el 61.45% en T5 (53.47% en la raíz y 7.98% en el tallo). Concluyendo que la especie *Stipa ichu* con enmiendas logra remover las concentraciones de plomo de suelos contaminados por los relaves mineros en más del 61.45%.

Palabras clave: fitorremediación, relave minero, plomo, *Stipa ichu*, humus

ABSTRACT

The present study aimed to evaluate the remediation of soils contaminated by mine tailings with lead content by the species *Stipa ichu* with amendments, because the high Andean soils are contaminated as a result of informal mining activities that generate contamination by heavy metals such as Pb, Hg, As. In the methodology, 5 treatments were experimented, then the concentration of lead accumulated by the species *Stipa ichu* was quantified to determine the bioaccumulation factor. In the results, the analyzes indicated that the species *Stipa ichu* preferably accumulated lead in the root with 21.91 mg / kg at day 45, 25.47 mg / kg at day 70 and 32.86 mg / kg at day 90, with lower concentrations in the aerial part with 3.78 mg / kg at day 45, 3.26 mg / kg at day 70 and 4.88 mg / kg at day 90; Furthermore, regarding the influence of substrates on phytoremediation, it was shown that those with higher organic content and physicochemical properties (pH, electrical conductivity and organic matter) in T4 and T5 promoted a greater decrease in lead in the soil, reaching removal efficiencies of up to 61.45% in T5 (53.47% in the root and 7.98% in the stem). Concluding that the species *Stipa ichu* with amendments manages to remove lead concentrations from soils contaminated by mine tailings by more than 61.45%.

Keywords: phytoremediation, mining tailings, lead, *Stipa ichu*, humus

1 INTRODUCCION

Hoy en día en el mundo una de las consecuencias más negativas de la revolución industrial ha sido la dispersión de contaminantes en la biota (Oha, 2023), entre ellos se encuentra la minería, que contribuye significativamente al crecimiento de la economía de los pueblos (Gutiérrez et al., 2022), sin embargo, genera riesgos ambientales asociados a los relaves que contienen concentraciones significativas de metales pesados, tales como plomo (Pb), arsénico (As), mercurio (Hg) y cadmio (Cd) que contaminan el agua aire y suelo con efectos potenciales en la calidad ambiental y la salud pública, esto debido a la toxicidad de estos metales y que son bioacumulativas (Wang et al., 2022).

Las principales fuentes de contaminación por estos metales son principalmente por fuentes industriales y sobre todo la minería (Ali et al., 2019), generando un impacto negativo en el medio ambiente, donde afecta a la calidad de los recursos hídricos y el suelo (Liao et al., 2017), como consecuente de esta situación se estudiaron métodos para descontaminar suelos con la presencia del metales pesados, dentro de ello se menciona la bioacumulación, considerada como un enfoque eficiente y rentable para estabilizar el metal pesado (Lozano et al., 2023).

Así mismo, en el contexto peruano, la minería es un sector valioso y con gran potencial minero, sin embargo, existen lugares donde las actividades mineras generan pasivos ambientales especialmente en las regiones de Ancash, Cajamarca, y Pasco (Gordillo & Rodríguez, 2022), que suman en total 8854 pasivos ambientales, y solo 2071 pasivos ambientales mineros (23.39%) se les ha asignado gestiones de remediación y reaprovechamiento, mientras que 6783 pasivos ambientales mineros (76.61%) no se les ha asignado alguna gestión para disminuir su riesgo hacia la salud de la población y el medio ambiente todo ello según el organismo de evaluación y fiscalización "OEFA" (2019), generando contaminación ambiental que desencadena conflictos sociales con la población e interfiere con la puesta en marcha de nuevos proyectos mineros (Quincho & Saldaña, 2023).

Cabe señalar que, las empresas mineras, principalmente desarrollan sus operaciones en zonas alto andinas sobre los 3200 msnm de altitud, donde la minería a tajo abierto realiza una deficiente disposición de sus relaves, con consecuencias ecológicas muy preocupantes, la contaminación del agua, degradación del suelo e impactos en la biodiversidad, representando un problema para las zonas altoandinas, en virtud de ello se requiere tecnologías para su remediación (Salamanca et al., 2023).

En la región de Puno, en específico en las zonas altoandinas como es el distrito de Ananea, no escapa de esta realidad, debido a que sus suelos están contaminados producto de las actividades mineras informales, produciendo una degradación de su calidad, afectando la biodiversidad y los ecosistemas locales, transformando los suelos menos fértiles, contaminando los cuerpos de agua y dañando significativamente la flora y fauna, a su vez, alterando directamente a la seguridad alimentaria de las comunidades que dependen de la agricultura, la ganadería y la pesca como medios primordiales de subsistencia (Servin, 2024).

Como consecuencia de los precedentes presentados, el uso de especies vegetales con capacidad de fitorremediar supone una nueva estrategia en el tratamiento de áreas contaminadas, principalmente con metales pesados, las cuales son un factor de riesgo latente tanto para la población de zonas aledañas y a la flora y fauna del lugar. Es por ello que esta técnica puede ser más efectiva y fácil de implementar a comparación de las demás técnicas y/o tecnologías que además de ser muy costosas son difíciles de implementar (Rivera & Alarcon, 2024), así mismo esta técnica permitirá restaurar la calidad de los recursos hídricos, suelo y la biodiversidad, de las zonas contaminadas.

Es importante señalar que las zonas altoandinas, son caracterizadas por altitudes elevadas, bajas temperaturas, alta radiación ultravioleta, suelos ácidos y pobres en materia orgánica, representando un entorno con alta dificultad para la adaptación y supervivencia de muchas especies vegetales, por lo que la elección de especies nativas o adaptadas, como *Stipa ichu*, es fundamental para el éxito del estudio.

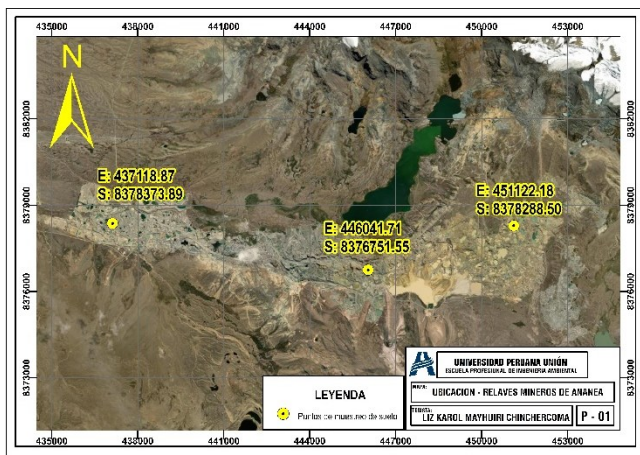
En ese contexto se plantea el objetivo de evaluar la remediación de suelo contaminado por relaves mineros con contenido de plomo mediante la fitorremediación utilizando la especie *Stipa ichu* con enmienda de humus.

2 Materiales y métodos

2.1 Lugar en estudio

Figura 1

Ubicación de la zona de estudio.



Los suelos altoandinos contaminados por relaves mineros, fueron obtenidos del distrito de Ananea, provincia de San Antonio de Putina, Puno, ubicada en las coordenadas UTM; 445539.00 m E y 8376498.00 m S, a una altitud de 4810 m.s.n.m.

En los tres puntos se ubican en zonas de mayor perturbación de relaves provenientes de minería aurífera informal y artesanal. Según estudios de la zona INGEMMET, los relaves presentan la siguiente composición geoquímica predominante: Sílice (SiO_2): 40–65 % - Alúmina (Al_2O_3): 10–20 %; Óxidos de hierro ($\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$): 3–10 %; Óxidos de calcio y magnesio (CaO , MgO): 1–8 %, pH - 5.5 – 7.5, Conductividad eléctrica con alta por presencia de sales solubles; presencia de sulfuros (pirita – FeS_2): 1–8 %; metales pesados (plomo, cadmio, arsénico, mercurio y zinc) que sobrepasan el rango permitido por el ECA de suelo.

2.2 Caracterizar el suelo contaminado por relave

La caracterización del relave se desarrolló siguiendo los lineamientos establecidos en la “Guía para el Muestreo de Suelos” del Decreto Supremo N.º 002-2014-MINAM. Donde se realizó el muestreo en 3 zonas específicas de los relaves mineros de zonas altoandinas de la región (distrito de Ananea); por ello los sitios fueron escogidos en base a un criterio visual de las zonas con mayor perturbación minera abarcando un cuadrante de 100m*100m (10000m²); para seguidamente aplicar el muestreo sistemático; el cual consiste en trazar una malla cuadrada en una determinada área y demarcar aquellas áreas consideradas sospechosas de estar contaminadas.

Se analizaron y determinaron la concentración de plomo (Pb) mediante espectrofotometría de absorción atómica. Asimismo, se evaluaron parámetros complementarios como pH, conductividad eléctrica (CE) y contenido de materia orgánica (MO). Los resultados obtenidos fueron comparados con los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para suelo, con el propósito de establecer el nivel de afectación y cumplimiento de la normativa ambiental vigente.

2.3 Procedimiento experimental

El proceso experimental se realizó con la preparación de diferentes sustratos (relave + tierra agrícola) (Vizconde, 2024), + humus (Oha, 2023), y + cal (Carbajal & Gómez, 2016).

Vizconde (2024), indica que la incorporación de suelo agrícola como sustrato puede mejorar la capacidad de extracción de metales pesados, donde indica que la proporción de 50% de relave mezclado con suelo agrícola en rangos de 15–30% alcanza las mejores remociones; además con respecto a Oha (2023), el tratamiento con una proporción del 30% de humus, permitió una remoción significativa de plomo y finalmente con respecto a Carbajal &

Gómez (2016), indica que una proporción del 5% de cal, es crucial para regular el pH y tener condiciones óptimas de fitorremediación.

Tabla 1

Tratamientos experimentales

Tratamiento	Sustratos
T1	Relave (100%)
T2	Relave (50%) + suelo agrícola (30%) + humus (15%) + cal (5%)
T3	Relave (50%) + suelo agrícola (25%) + Humus (20%) + cal (5%)
T4	Relave (50%) + suelo agrícola (20%) + Humus (25%) + cal (5%)
T5	Relave (50%) + suelo agrícola (15%) + Humus (30%) + cal (5%)

El relave a utilizar fue mezclado homogéneamente con las proporciones descritas en los diferentes tratamientos (Gutiérrez et al., 2022).

Posteriormente se realizó nuevamente el análisis de la concentración de Plomo con la combinación de las diferentes proporciones del sustrato, a la par corroborando el pH, conductividad eléctrica y materia orgánica en cada unidad experimental.

2.4 Recolección de la especie *Stipa lchu*

Para el desarrollo experimental se obtuvo esquejes de la especie *Stipa lchu*, que crezcan cerca de los relaves, esta selección de la especie fue realizada en base a Romero & Bravo (2021), donde indica la capacidad de adaptación a la exposición de metales pesados que tienen las plantas en zonas cercanas a unidades mineras o pasivos mineros dejados por antiguas operaciones, escogiendo las que presentan condiciones óptimas con respecto a sus hojas, tallos y raíces.

Para el traslado de las plantas se usaron bolsas de plástico ziploc, en donde cada una de ellas presento un ejemplar de la especie *Stipa ichu*, posteriormente fueron ubicadas en un cooler, hasta su llegada a la zona del experimento.

2.5 Construcción de las unidades experimentales

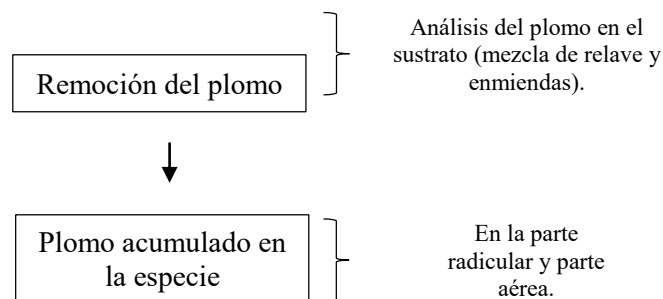
Para ello se preparó 15 divisiones cuadradas de 25cm x 25cm en forma de recipientes que tengan la funcionalidad de maceteros, de un volumen de 7kilos a condiciones ambientales, para posteriormente disponer el sustrato con las diferentes proporciones establecidas anteriormente (tabla 1), y a la par fueron colocadas las plantas de la especie *Stipa Ichu* en cada unidad experimental.

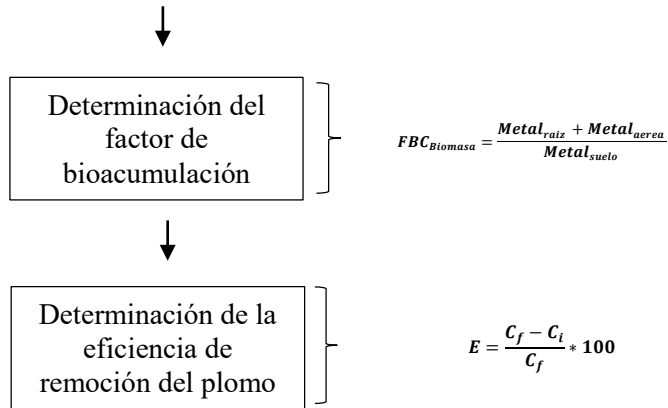
Se realizo el riego de cada unidad experimental con agua, cada 3 días para garantizar su desarrollo durante todo el ciclo del cultivo de la especie *Stipa ichu*, evitando de tal manera el exceso de humedad y el ataque de patógenos que puedan causar algún daño a la especie vegetal en estudio (Flores, 2022).

2.6 Determinación de la concentración del Plomo

Según Oha (2023) realizó el monitoreo de la concentración del plomo al día 30, 60 y 90 en la parte radicular (raíz) y la parte aérea (tallo) de la planta. Sin embargo, en este caso se realizó el monitoreo al día 45, 70 y 90, considerando las condiciones climáticas ambientales.

Diagrama para la determinación de la eficiencia de remoción del plomo.





2.7 Determinación del factor de bioacumulación de la especie *Stipa Ichu*

Una vez obtenido los resultados de la concentración de metales (Pb) culminados los tratamientos, se procedió a calcular el Factor de Bioacumulación, este factor determina la concentración de metales que se ha extraído del suelo en raíces (FBC_{Raiz}), en la parte aérea de la planta (FBC_{Aerea}) y en la biomasa total de la planta ($FBC_{Biomasa}$), estos factores se calcularon entre la concentración del metal en el tejido aéreo, radicular y en la biomasa total de la planta (mg/kg) con la concentración del metal en el suelo (mg/kg), todo ello calculado de acuerdo al método propuesto por Olivares & Peña (2009), a través de las siguientes fórmulas:

$$FBC_{Biomasa} = \frac{Metal_{raiz} + Metal_{aerea}}{Metal_{suelo}} \quad (\text{Ec. 1})$$

$$FBC_{raiz} = \frac{Metal_{raiz}}{Metal_{suelo}} \quad (\text{Ec. 2})$$

$$FBC_{aerea} = \frac{Metal_{aerea}}{Metal_{suelo}} \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde: ($FBC_{Biomasa}$) Factor de bioacumulación en la parte aérea de biomasa, (FBC_{raiz}) Factor de bioacumulación en las raíces de la planta, (FBC_{aereo}) Factor de bioacumulación en la parte aérea de la planta, ($Metal_{raiz}$) Concentración del metal solo en la raíz de la planta en mg/Kg, ($Metal_{aerea}$) Concentración del metal solo en la parte aérea de la planta en mg/Kg, ($Metal_{suelo}$) Concentración del metal en el suelo en mg/Kg.

Vizconde (2024), clasifica a la planta como:

Tabla 2

Factor de bioacumulación de la planta.

Rangos	Descripción
$FBC_{aerea\ y\ raiz} < 1$	La planta es excluyente
$1 < FBC_{aerea\ y\ raiz} > 10$	La planta es acumuladora
$FBC_{aerea\ y\ raiz} > 10$	La planta es hiperacumuladora

2.8 Determinación de la eficiencia de remoción del plomo

Se calculo la eficiencia de remoción de plomo mediante la correlación porcentual entre la concentración inicial y final del metal presente en cada sustrato, según la fórmula (Torrel, 2020):

$$E = \frac{C_f - C_i}{C_f} * 100 \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde: (*E*) Eficiencia de remocion, (*C_i*) Concentración inicial del metal, (*C_f*) Concentración final del metal.

2.9 Diseño estadístico

El experimento se condujo bajo un Diseño Completamente al Azar (DCA) ANOVA, con un arreglo factorial de 5 x 3 (5 tipos de sustratos “Tratamientos” con 3 repeticiones), totalizando 15 unidades experimentales.

El modelo estadístico, es el siguiente:

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij}$$

i = 1,2, ..., *t* (*t*=tratamientos = **5 tratamientos**)

$j = 1, 2, \dots, r$ ($r = \text{repeticiones} = 3 \text{ repeticiones}$)

Donde: (Y_{ij}) Variable de respuesta observada o medida en el i -ésimo tratamiento y el j -ésimo bloque, (μ) Efecto de la media general, (τ_i) Efecto del i -ésimo tratamiento, (ε_{ij}) Efecto verdadero de la j -ésima unidad experimental, sujeta al i -ésimo tratamiento (error experimental).

3 Resultados y discusión

3.1 Concentración testigo de Plomo y propiedades fisicoquímicas del relave y la especie *Stipa ichu*

Se presentan los resultados del análisis de la especie *Stipa ichu* y las tres muestras de relave colectadas en zonas adyacentes a pasivos mineros en el distrito de Ananea en la tabla 3, los cuales fueron comparados con el ECA de suelo D.S. N° 011 – 2017 MINAM.

Tabla 3

Concentración de Plomo y propiedades fisicoquímicas del relave y la planta.

Parámetros	Relave				Especie (<i>Stipa ichu</i>)		Unidades	Metodología	Norma
	Punto	Punto	Punto	Promedio	Raíz	Tallo			
	01	02	03						
pH	4.03	3.96	3.82	3.94	-	-	Unid. de pH	Electrométrico	NTP 339.176
Conductividad	335	353	345	344	-	-	$\mu\text{S/cm}$	Electrométrico	NTP 339.176
Materia orgánica	0.03	0.03	0.07	0.04	-	-	%	Ignición	INV-121-13
Plomo (Pb)	158.4	155.1	152.6	155.37	0.0032	0.0005	mg/kg	Absorción atómica	ISO 7303:2025
ECA suelo para plomo	*	*	*	*			mg/kg		

Nota. * = 70 mg/k

La tabla 3 muestra que el relave presenta valores de un pH ácido, los cuales oscilaron entre 3.82 y 4.03, evidenciando que dos de los tres puntos muestreados (Punto 02 y Punto 03) presentan condiciones de acidez elevada, lo cual puede estar relacionado con la oxidación de minerales sulfurados, característica típica de suelos impactados por relaves mineros como lo menciona (Flores 2022).

Según Ministerio de desarrollo agrario y riego “MINAGRI” (2022), indica que la conductividad eléctrica (CE), se registraron valores que fluctúan entre 335 y 353 $\mu\text{S}/\text{cm}$, indicando que los suelos no presentan problemas de salinidad y son considerados adecuados para la subsistencia de las especies vegetales.

Por otro lado, la materia orgánica (MO) mostró niveles deficientes, con valores que van de 0.03% a 0.07%, lo cual indica un suelo empobrecido en nutrientes y con baja capacidad de retención de metales (Chang *et al.*, 2018), según Carbajal & Gómez (2016), mencionan que para favorecer la inmovilización de metales la cantidad de MO debe ser superior al 2%.

Respecto a la concentración de plomo (Pb) en los tres puntos se presentaron valores que superaron el límite permitido por el Estándar de Calidad Ambiental (ECA) para suelos de uso agrícola (70 mg/kg), registrando para el punto 01 (158.4 mg/kg), punto 02 (155.1 mg/kg) y punto 03 (152.6 mg/kg), indicando presencia de plomo con riesgo ambiental inmediato para el ecosistema y la salud de las personas asociada al arrastre de relaves o a mejores condiciones de retención edáfica. Se indica que las concentraciones de metales pesados como el Pb pueden persistir en el ambiente y acumularse en organismos vivos, generando efectos tóxicos a largo plazo (Ali *et al.*, 2019).

Cabe señalar que las concentraciones de plomo cuantificadas en la especie, correspondientes a 0.0032 mg/kg en raíz y 0.0005 mg/kg en tallo, se encuentra por debajo del umbral máximo establecido por los Estándares de Calidad Ambiental para Suelo.

3.2 Influencia de los sustratos en la fitorremediación de plomo

En la Tabla 4 se observa una disminución progresiva de la concentración de plomo (Pb) en los sustratos a lo largo del tiempo para los cinco tratamientos evaluados (T1–T5).

Tabla 4

Concentración de plomo en el sustrato correspondiente a cada unidad experimental.

Parámetros evaluados	Días de monitoreo	Tratamientos					Unid.
		T1	T2	T3	T4	T5	
pH	45	8.50	9.03	11.53	9.10	9.73	Unid. de pH
pH	70	8.10	9.00	9.60	9.70	10.60	Unid. de pH
pH	90	7.33	9.87	9.37	9.33	9.33	Unid. de pH
CE	45	357.22	430.33	734.00	682.33	531.33	μS/cm
CE	70	193.00	290.33	391.33	341.67	413.33	μS/cm
CE	90	194.97	378.33	331.00	257.00	17.77	μS/cm
MO	45	8.2	15.30	13.70	20.54	18.40	%
MO	70	4.90	11.60	18.90	23.47	15.27	%
MO	90	5.87	13.90	18.87	19.37	15.63	%
Pb - Inicial		155.4	82.9	76.9	74.7	71.9	mg/kg
Pb	45	145.08	72.95	51.94	49.33	64.24	mg/kg
Pb	70	132.93	60.07	44.73	47.17	38.80	mg/kg
Pb	90	121.25	51.90	43.78	37.48	26.98	mg/kg

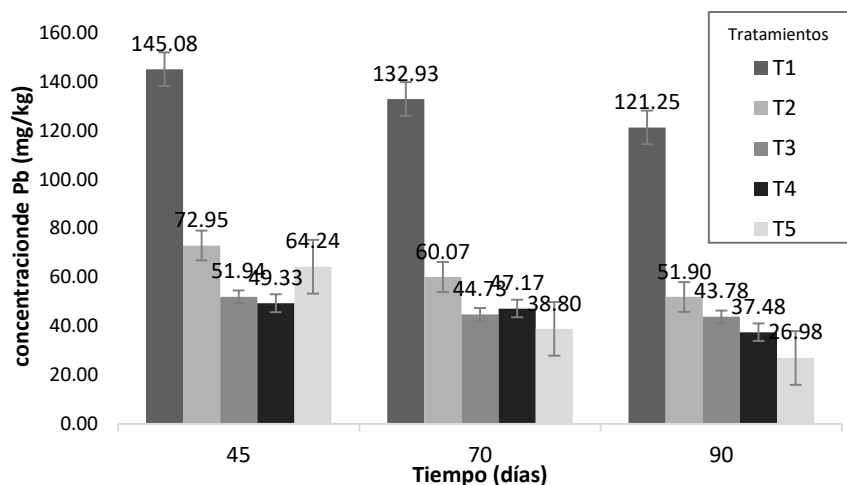
Nota. pH= potencial de hidrogeno; CE = Conductividad eléctrica; MO = Materia orgánica; Pb = plomo

Las concentraciones iniciales resultaron 155.4 mg/kg (T1), 82.9 mg/kg (T2), 76.9 mg/kg (T3), 74.7 mg/kg (T4) y 71.9 mg/kg (T5). A los 90 días, el tratamiento T5 registró la mayor disminución, alcanzando 26.98 mg/kg, mientras que T1 mostró la menor reducción con 121.25 mg/kg. El T4 también presentó una notable reducción con 37.48 mg/kg al día 90

Estos resultados coinciden con los hallazgos de Oha (2023), donde la especie *Stipa ichu* en las primeras semanas de fitorremediación, se caracteriza por una limitada retención de plomo debido al ajuste fisiológico de la planta al medio contaminado; mientras que en la etapa intermedia se destacó por una reducción considerable del plomo, atribuida al aumento de biomasa vegetal, además de estabilizarlo mediante interacciones con la materia orgánica del suelo, y finalmente al día 90 también reportó una remoción de más del 60% del plomo inicial , junto con una mejora en las condiciones químicas del sustrato. En ambos casos, el aumento del tiempo de contacto permite que los procesos de absorción, acumulación y precipitación de plomo sean más efectivos, generando un suelo más estable y con menor toxicidad.

Figura 2

Disminución de la concentración de plomo en el sustrato por tratamiento.



La tendencia de disminución del Pb en los tratamientos aplicados sugiere una influencia directa de los sustratos en el proceso de fitorremediación. Se observa que, el tratamiento T5 logró reducir los niveles de plomo por debajo del 40% del valor inicial, lo cual puede estar asociado a una mayor retención por materia orgánica o a una mejor adaptación de las especies *Stipa Ichu*.

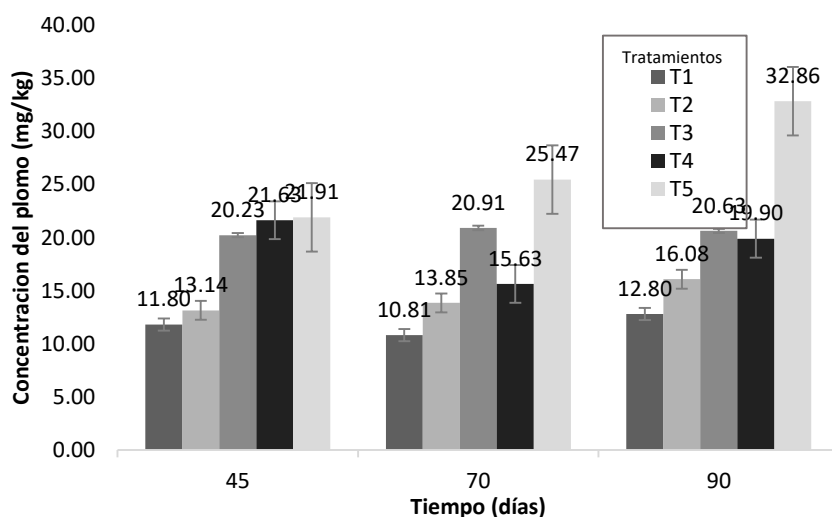
Como menciona Flores (2022), los sustratos ricos en materia orgánica promueven la inmovilización de metales pesados y mejoran la capacidad de absorción en raíces. Además, la estabilización del pH en niveles ligeramente alcalinos, como se observa en los tratamientos T3–T5, favorece la precipitación del Pb y disminuye su movilidad, lo cual es consistente con lo señalado por (Liu *et al.*, 2019).

3.3 Cantidad de Plomo absorbido por la especie *Stipa ichu*

Los resultados de la concentración de plomo (Pb) acumulado en raíz y tallo de la especie *Stipa ichu* para los cinco tratamientos (T1 a T5) durante 45, 70 y 90 días se muestran en la figura 3 y 4. Los datos representan el promedio de tres repeticiones por tratamiento.

Figura 3

Concentración de plomo absorbido por la raíz de la especie Stipa ichu.



Respecto a la figura 3, se observa un incremento progresivo en la acumulación de Pb en la raíz en base al tiempo de tratamiento. En donde, el tratamiento T5 presentó los valores más altos alcanzando 32.86 mg/kg a los 90 días, seguido por T3 con 20.63 mg/kg y T4 con 19.90 mg/kg. En contraste, T1 mantuvo los niveles más bajos, con 12.80 mg/kg al final del

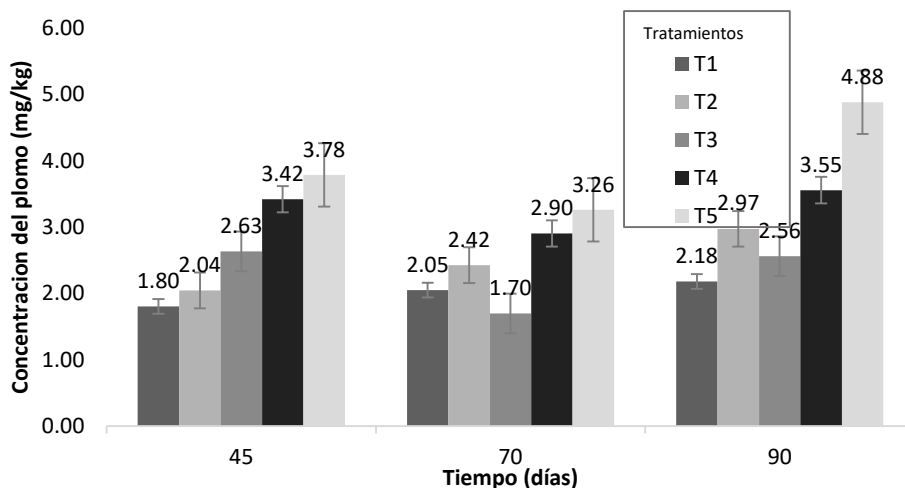
experimento. Este patrón sugiere que los tratamientos empleados favorecieron la absorción radicular del metal.

Esta mayor bioacumulación en raíz concuerda con los resultados obtenidos por Ali *et al.* (2019), quienes indican que las raíces actúan como primera barrera de defensa, acumulando metales pesados. Asimismo, Argota *et al.*, (2014), destacan que, en especies adaptadas a suelos contaminados, la acumulación de Pb tiende a concentrarse en raíces debido a su escasa movilidad sistémica.

Además, Flores (2022) y Ticona (2021) señalan que el tiempo de tratamiento incrementa la capacidad de acumulación, lo que se refleja en el aumento gradual observado especialmente en T3, T4 y T5. Esto demuestra que con el tiempo y bajo condiciones adecuadas (pH, materia orgánica), las especies vegetales empleadas pueden capturar eficientemente Pb en su sistema radicular.

Figura 4

Concentración de plomo absorbido por el tallo de la especie *Stipa ichu*.



De acuerdo a los resultados de mostrados en la figura 4, se observó que las concentraciones de Pb absorbidas en el tallo de la especie *Stipa ichu* fueron

considerablemente más bajas que en las raíces, con valores máximos en el tratamiento T5 (4.88 mg/kg a los 90 días), lo cual sugiere una baja translocación del metal hacia la parte aérea de la planta. El resto de tratamientos mostró concentraciones que no superaron los 3.55 mg/kg, manteniéndose estables a lo largo del tiempo.

Según Amone & Barja (2019), este comportamiento limita la translocación de Pb hacia la parte aérea de la especie vegetal, principalmente por la baja movilidad del metal en el xilema. Del mismo modo, Chang *et al.*, (2018) explican que las plantas tienden a inmovilizar metales en la raíz como una estrategia de protección celular, reduciendo el riesgo de fitotoxicidad en hojas y tallos.

Por su parte, Romero & Bravo (2021) encontraron que ciertas especies andinas nativas mantienen esta tendencia de acumulación preferencial en raíz, especialmente en suelos con alto contenido de materia orgánica y pH ligeramente alcalino, condiciones similares a las de los tratamientos T3 a T5 de este estudio.

3.4 Factor de Bioacumulación

Para evaluar la capacidad de bioacumulación de *Stipa ichu*, se calculó el Factor de Bioacumulación (FBC) en raíz, parte aérea y biomasa total, a los 90 días de tratamiento.

Tabla 5

Factor de bioacumulación de Stipa ichu a los 90 días.

Tratamiento	Pb Suelo (mg/kg)	Pb Raíz (mg/kg)	Pb Tallo (mg/kg)	FBC Raíz	FBC Aérea	FBC Biomasa
T1	121.25	12.8	2.18	0.11	0.02	0.12
T2	51.9	16.08	2.97	0.31	0.06	0.37
T3	43.78	20.63	2.56	0.47	0.06	0.53

T4	37.48	19.9	3.55	0.53	0.09	0.63
T5	26.98	32.86	4.88	1.22	0.18	1.40

De acuerdo a la tabla 5 los resultados indican un incremento progresivo del factor de bioacumulación en todos los tratamientos conforme disminuye la concentración de plomo en el suelo, evidenciando un mayor aprovechamiento del metal por la *Stipa ichu* es más controlado. El tratamiento T5 alcanzó un FBC Biomasa de 1.40, indicando una elevada capacidad de extracción de metales, mientras que T1 presentó valores muy bajos (0.12), mostrando poca eficiencia de extracción.

Según Olivares & Peña (2009), un $FBC > 1$ indica un comportamiento acumulador eficiente, lo que se observa en T5. Asimismo, aplicando la clasificación de Vizconde (2024), se determinó que:

- En T1 y T2, *Stipa ichu* actúa como indicadora, pues la mayor parte del metal permanece en el suelo.
- En T3 y T4, se comporta como una especie tolerante, al presentar mayor acumulación en la raíz respecto al suelo. .En T5, se observa un comportamiento tolerante con potencial hiperacumulador, ya que la acumulación en raíz supera a la del suelo y transloca una fracción significativa hacia la parte aérea.

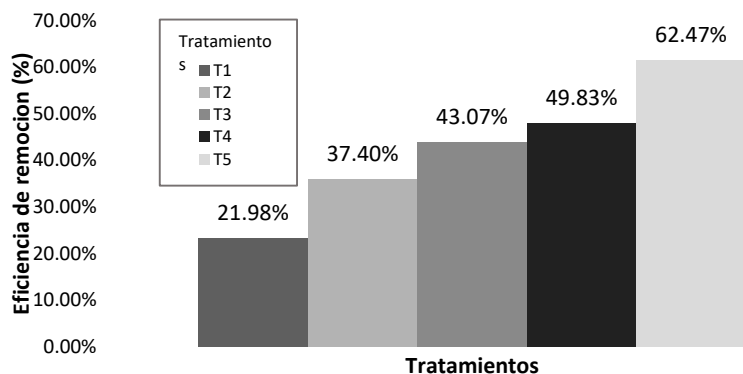
Este comportamiento es similar al resultado reportado por Amones & Barja (2019), quienes destacaron que muchas especies altoandinas, pese a su crecimiento lento, desarrollan adaptaciones fisiológicas que favorecen la acumulación de metales pesados en condiciones de alta presión edáfica, especialmente en raíces, con baja translocación hacia la parte aérea.

3.5 Eficiencia de remoción del plomo empleando la especie *Stipa Ichu*

La eficiencia de remoción del plomo en el sustrato se calculó tomando como concentración inicial (C_i) y como concentración final (C_f) la concentración residual a los 90 días para cada tratamiento.

Figura 5

Eficiencia de bioacumulación de plomo (Pb) por tratamiento con Stipa ichu.



De acuerdo al gráfico 5 los resultados muestran una mejora progresiva en la eficiencia de bioacumulación de Pb en función del tratamiento, donde el tratamiento T5 es el más eficaz con un 62.47 %. Este comportamiento puede estar relacionado con la capacidad fisiológica de *Stipa ichu* para tolerar concentraciones elevadas de metales y acumularlos, particularmente en su sistema radicular (Amones & Barja, 2019). Esta capacidad de eficiencia ha sido confirmada por investigaciones como la de Liu *et al.*, (2019), quienes evidenciaron que ciertas especies vegetales adaptadas a ambientes con alta presencia de metales pesados pueden activar mecanismos fisiológicos y bioquímicos que favorecen la tolerancia y una acumulación diferenciada del metal, en función de las características del sustrato.

Asimismo, la disminución sustancial del Pb en los tratamientos T3, T4 y T5, presentan una alta capacidad de absorber metales pesados, facilitando procesos de fitoestabilización y extracción. El comportamiento observado también puede estar influenciado por las características físico-químicas del suelo (pH, MO, CE), que condicionan la disponibilidad del Pb para su absorción.

En la tabla 6, se aprecia el análisis de varianza (ANOVA) para la remoción del plomo en los sustratos de los tratamientos, indicando que para efectos de los tratamientos la remoción del plomo, es altamente significativo (p -valor <0.05), así mismo para efectos de los días de

monitoreo también es altamente significativo (p -valor <0.05), mientras que para efectos del tratamiento*días de monitoreo de igual forma es altamente significativo (p -valor <0.05), confirmando que la remoción del plomo en los sustratos varía considerablemente en cada tratamiento y días de monitoreo.

Tabla 6

Análisis de varianza (ANOVA) para la remoción del plomo en los sustratos de los tratamientos.

F.V.	SC	gl	CM	F	Sig.
Tratamiento	52705.8	5	13176.5	1976.85	4.14854E-19
Días De Monitoreo	3160.7	3	1580.3	237.10	7.31518E-36
Tratamiento*días de monitoreo	900.0	15	112.5	16.88	3.64861E-09
Error	200.0	30	6.7		
Total	56966.4	53			

En la tabla 7, se aprecia la prueba de Tukey para la para la remoción del plomo en los sustratos de los tratamientos, indicando que el tratamiento 5 resalta estadísticamente, con una concentración final de 43.34 mg/kg, mientras que el tratamiento 1, no destaca estadísticamente presentando una concentración final de 133.09 mg/kg.

Tabla 7

Prueba de Tukey para la remoción del plomo en los sustratos de los tratamientos.

Tratamiento	Media (mg/kg)	N	Agrupación
T1	133.09	9	a
T2	61.64	9	b

T3	46.82	9	c
T4	44.66	9	c
T5	43.34	9	c

Estos resultados comparados con Zhang et al. (2022), indican que la materia orgánica genera grupos funcionales carboxílicos y fenólicos que se enlazan con el plomo formando complejos estables, mientras que la cal incrementa el pH y promueve la formación de carbonatos insolubles de Pb. De manera similar Wróbel et al. (2019), hallaron que el uso combinado de enmiendas orgánicas e inorgánicas disminuyó más del 60 % del contenido disponible de plomo en suelos contaminados. Por lo tanto, los resultados del presente estudio confirman la eficacia de los sustratos en la estabilización química del Pb en relaves, observándose que los tratamientos con mayor proporción de humus y cal (T4 y T5) fueron los más eficientes, en concordancia con lo reportado por Lim et al. (2013), quienes destacaron la acción sinérgica de materiales calcáreos y compost en la reducción del Pb disponible para las plantas.

En la tabla 8, se aprecia el análisis de varianza (ANOVA) para la bioacumulación del plomo en la raíz de la especie *Stipa ichu*, indicando que para efectos de los tratamientos la bioacumulación del plomo es altamente significativo (p -valor <0.05), así mismo para efectos de los días de monitoreo también la bioacumulación del plomo es altamente significativo (p -valor <0.05), mientras que para efectos del tratamiento*días de monitoreo de igual forma es altamente significativo (p -valor <0.05), confirmando que la bioacumulación del plomo en la raíz varía considerablemente en cada tratamiento y días de monitoreo

Tabla 8

Análisis de varianza (ANOVA) para la bioacumulación del plomo en la raíz de la especie Stipa ichu.

F.V.	SC	gl	CM	F	Sig.
Tratamiento	1212.23	5	160.95	56.49	1.541E-13
Días De	86.33	3	43.163	8.05	0.002
Monitoreo					
Tratamiento*días de monitoreo	178.99	15	43.163	4.17	0.002
Error	160.95	30	5.365		
Total	160.95	53			

En la tabla 9, se aprecia la prueba de Tukey para la bioacumulación del plomo en la raíz de la especie *Stipa ichu*, indicando que el tratamiento 5 resalta estadísticamente con una acumulación promedio de 26.75 mg/kg de plomo, mientras que el tratamiento 1, no resalta estadísticamente con una acumulación promedio de 11.80 mg/kg de plomo.

Tabla 9

Prueba de Tukey para la bioacumulación del plomo en la raíz de la especie Stipa ichu.

Tratamiento	Media (mg/kg)	N	Agrupación
T5	26.750	9	a
T3	20.590	9	b
T4	19.050	9	b
T2	14.358	9	c
T1	11.806	9	c

Estos datos comparados con Geiger et al. (2021), indicaron que el exceso de materia orgánica puede aumentar la movilidad del Pb bajo ciertas condiciones de pH. Sin embargo, la acumulación mayoritaria en raíces y no en tallos confirma que *Stipa ichu* actúa principalmente

como fitorremediadora acumuladora, concentrando el metal en tejidos subterráneos sin una translocación excesiva hacia la parte aérea, como describen Altonar et al. (2022), en estudios con especies gramíneas. Adicionalmente, el efecto del tiempo de exposición (45, 70 y 90 días) contribuye a estabilizar las interacciones entre el plomo y las enmiendas, tal como reportaron Buskunova et al. (2019), quienes observaron que la fijación de Pb en raíces aumentó gradualmente hasta los 90 días de tratamiento.

En la tabla 10, se aprecia el análisis de varianza (ANOVA) para la bioacumulación del plomo en el tallo de la especie *Stipa ichu*, indicando que para efectos de los tratamientos la bioacumulación del plomo es altamente significativo (p -valor <0.05), así mismo para efectos de los días de monitoreo también la bioacumulación del plomo es altamente significativo (p -valor <0.05), mientras que para efectos del tratamiento*días de monitoreo de igual forma es altamente significativo (p -valor <0.05), confirmando que la bioacumulación del plomo en el tallo varía considerablemente en cada tratamiento y días de monitoreo.

Tabla 10

Análisis de varianza (ANOVA) para la bioacumulación del plomo en el tallo de la especie Stipa ichu.

F.V.	SC	gl	CM	F	Sig.
Tratamiento	23.3533	5	5.8383	595.07	7.20418E-19
Días De Monitoreo	4.4736	3	2.2368	595.07	4.21495E-28
Tratamiento *días de monitoreo	3.4614	15	0.4326	44.10	1.67687E-14
Error	0.2943	30	0.0098		
Total	31.5827	53			

En la tabla 11, se aprecia la prueba de Tukey para la bioacumulación del plomo en el tallo de la especie *Stipa ichu*, indicando que el tratamiento 5 resalta estadísticamente con una acumulación promedio de 3.97 mg/kg de plomo, mientras que el tratamiento 1, no resalta estadísticamente con una acumulación promedio de 2.01 mg/kg de plomo.

Tabla 11

Prueba de Tukey para la bioacumulación del plomo en el tallo de la especie Stipa ichu.

Tratamiento	Media (mg/kg)	N	Agrupación
T5	3.972	9	a
T4	3.290	9	b
T2	2.479	9	c
T3	2.294	9	c
T1	2.011	9	c

Este comportamiento coincide con lo observado por Zhang et al. (2022), quienes señalaron que el Pb tiende a acumularse principalmente en raíces debido a su baja movilidad en la xilema y su fuerte afinidad con los grupos carboxílicos de las paredes celulares radiculares. Además, Gordillo et al. (2022), demostraron que las especies gramíneas nativas, como *Stipa ichu*., pueden retener más del 80 % del Pb absorbido en la raíz, limitando su transporte hacia los brotes. En este contexto, la ligera diferencia entre T5 y T1 podría atribuirse a la mejora en las condiciones nutricionales del sustrato por la adición de humus y cal, lo que incrementa la actividad metabólica y la absorción general de elementos, incluyendo trazas metálicas. No obstante, la baja concentración en tallos refleja una efectiva barrera fisiológica que evita la contaminación de la parte aérea, confirmando el potencial de *Stipa ichu* como especie fitoestabilizadora, tal como lo plantean Altonar et al. (2022), en sus estudios sobre fitoremediación asistida con enmiendas.

4 Conclusiones

Los resultados de este estudio indican que las concentraciones de plomo en los relaves analizados superan los valores establecidos por el ECA Suelo, identificando características adversas como baja materia orgánica y alta acidez, condiciones que podrían limitar la recuperación natural del suelo y requerir el uso de enmiendas para procesos de fitorremediación efectivos.

En cuanto a la cuantificación del Pb absorbido por *Stipa ichu*, los análisis indicaron que la especie acumuló preferentemente el plomo en la raíz con 21.91mg/kg al día 45, 25.47mg/kg al día 70 y 32.86 mg/kg al día 90 (T5), y con menores concentraciones en la parte aérea con 3.78mg/kg al día 45, 3.26mg/kg al día 70 y 4.88 mg/kg al día 90 (T5)

Respecto a la influencia de los sustratos en la fitorremediación, se evidenció que aquellos con mayor contenido orgánico y propiedades fisicoquímicas favorables (pH, conductividad eléctrica y materia orgánica) en el "T5" Relave (50%) + suelo agrícola (15%) + Humus (30%) + cal (5%), promovieron una mayor disminución de Pb en el suelo, alcanzando eficiencias de bioacumulación de hasta 62.47%, lo cual refleja una influencia positiva del sustrato en la movilización y absorción del metal.

5 Referencias

- Ali, H., Khan, E., & Ilahi, I. (2019). Environmental Chemistry and ecotoxicology of hazardous heavy metals: environmental persistence, toxicity, and bioaccumulation. *Journal of Chemistry*, 1 - 14. doi: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1155/2019/6730305>
- Altonar, X., Tzintzun, K., Vallejo, V., & Lindig, R. (2022). Respuesta de plantas jóvenes de cuatro especies de coníferas a la exposición al Mercurio. *Madera y bosques*, 1 - 11. doi: <https://doi.org/10.21829/myb.2021.2732160>
- Amones, R., & Barja, M. (2019). • *Capacidad de acumulación de plomo de las especies adventicias Amaranthus quitensis, Chenopodium ambrosioides y Tagetes minuta en diferentes tipos de suelos*. Lima: Universidad Peruana Unión.
<https://hdl.handle.net/20.500.12840/2980>
- Arce, S., Calderon, J., & Jarecca, Y. (2021). Optimización del proceso de Fito remediación con Festuca Dolichophylla y tiosulfa to 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. *Revista del Instituto de investigación de la Facultad de minas, metalurgia y ciencias geográficas de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos*, 1 - 8. doi: <https://doi.org/10.15381/iigeo.v24i48.21765>
- Argota, G., Encinas, M., Argota, H., & Iannacone, J. (2014). *Coefficientes biológicos de fitorremediación de suelos expuestos a plomo y cadmio utilizando Alopecurus Magellanicus Bracteatus y Muhlenbergia Angustata (Poaceae), Puno, Perú*. Puno: Laboratorio Ecotoxicología. Grupo de Estudios Preclínicos. Centro de Toxicología y Biomedicina. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4755671>
- Buskunova, G., & Ibulova, G. (2019). Características de la acumulación de metales pesados por plantas Urtica dioica L. y Urtica urens L. *Materiales del IX Congreso internacional*

- científico-práctico, Ufa, 57-61. Rusia: Sociedad de Responsabilidad Limitada "Aeterna"., 57 - 61.*
- Carbajal, K., & Gómez, C. (2016). Efecto de la aplicación de cal dolomita sobre el pH del suelo y rendimiento de sorgo sureño en suelos de uso agrícola, Zamorano, Honduras. *Escuela Agrícola Panamericana de Zamorano - Honduras*, 1 - 28. Obtenido de <https://bdigital.zamorano.edu/handle/11036/5927>
- Chang, J., Gonzales, O., Ponce, L., Ramírez, V., León, A., Torres, M., . . . Loayza, M. (2018). *Acumulación de metales pesados en plantas nativas andinas: herramientas potenciales para la fitorremediación de suelos en Ancash (Perú)*. Ancash: Environmental Science and Pollution. doi: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.01.075>
- Córdova, I. (2018). *"Instrumentos de investigación"*. Lima: San Marcos de Aníbal Jesús Paredes Galván. Obtenido de http://catalogovirtual.bibliotecaep.mil.pe/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=7042&shelfbrowse_itemnumber=14212
- DS. N° 002-MINAM. (2014). *Guía para muestreo de suelos*. Lima: Ministerio del Ambiente. Obtenido de https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2014/04/GUIA-MUESTREO-SUELO_MINAM1.pdf
- Flores, S. (2022). *Evaluación de la fitoextracción de metales pesados a través del Dactylis glomerata y Trifolium pratense de suelos aledaños al pasivo ambiental minero Santo Toribio, Independencia - Ancash*. Huaraz: Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo. Obtenido de <http://repositorio.unasam.edu.pe/handle/UNASAM/5495>
- Gordillo, J., & Rodríguez, J. (2022). *Propuesta de sistema de tratamiento por fitorremediación de relaves mineros auríferos cianurados como parte del Plan de Cierre de Empresa minera metalúrgica DA – CREIN S.A.* Arequipa: Universidad Tecnológica del Perú. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.12867/6487>
- Gutiérrez, A., Quispe, G., Betancur, H., & Huanca, R. (2022). Remoción de plomo en suelos contaminados con relaves mineros a través del vermicompostaje. *Revista de*

- investigaciones agropecuarias*, 1 - 10. Obtenido de http://www.scielo.org.ar/scielo.php?pid=S1669-23142022000300267&script=sci_arttext
- Hernandez, R., & Fernandez, C. (2018). *Metodología de la Investigación*. Mexico: McGrawHill Education.
- Jaramillo, O., & Trujillo, H. (2021). *Uso de especies vegetales bioacumuladoras como alternativa sustentable en procesos de fitorremediación. Pereira, Colombia*. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira. Obtenido de <https://hdl.handle.net/11059/13719>
- Liao, J., Chen, J., Ru, X., Chen, J., Wu, H., & Wei, C. (2017). Heavy metals in river surface sediments affected with multiple pollution sources, South China: Distribution, enrichment and source apportionment. *Journal of Geochemical*, 9 - 16. doi: <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2016.08.013>
- Llacza, H. (2021). *Evaluación de la biosorción de Pb en hongos filamentosos del distrito de Santa Bárbara de Carhuacayán, Yauli – Junín*. Lima: Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Obtenido de <https://cybertesis.unmsm.edu.pe/backend/api/core/bitstreams/03284ecf-89f1-4c47-9086-a7799bcf98e1/content>
- Lozano, C., Huamán, Y., Lozano, A., & Aniceto, J. (2023). Bioacumulación del Plomo y su efecto en plantas cultivadas de Zea Mays en un vertedero municipal. *Revista Amazonica de Ciencias Ambientales*, 1 - 10. doi: <https://doi.org/10.51372/bioagro333.2>
- Manchego, L., Sarmiento, G., & Bocardo, E. (2021). Especies vegetales nativas con potencial para la fitorremediación de suelos alto andinos contaminados por residuos de actividad minera. *Bioagro*, Arequipa. doi:<https://doi.org/10.51372/bioagro333.2>
- Montes, J. (2019). *Evaluación de la capacidad fitoextractora en Medicago sativa l. para disminuir la concentración de plomo en suelos contaminados con relaves mineros ubicados en el distrito de Coayllo, Cañete - Lima*. Villa El Salvador: Universidad

Nacional Tecnológica de Lima Sur.

<http://repositorio.untels.edu.pe/jspui/handle/123456789/437>

Montes, J. (2019). *Evaluación de la capacidad fitoextractora en Medicago Sativa L. para disminuir la concentración de plomo en suelos contaminados con relaves mineros ubicados en el distrito de Coayllo, Cañete - Lima, Perú*. Villa El Salvador: Universidad Nacional Tecnológica de Lima Sur. Obtenido de <http://repositorio.untels.edu.pe/jspui/handle/123456789/437>

Oha, R. (2023). *Remoción del plomo en suelos aledaños al área degradada por residuos sólidos de Cancharani, mediante Stipa ichu, Puno-2022*. 2023: Universidad Andina Nestor Caceres Velasquez.

Olivares, E., & Peña, E. (2009). Bioconcentración de elementos minerales en *Amaranthus dubius* (bledo, pira), creciendo silvestre en cultivos del estado Miranda, Venezuela, y utilizado en alimentación. *Interciencia*, 604 - 611. Obtenido de https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0378-18442009000900004

Quincho, C., & Saldaña, V. (2023). *Análisis de la fitoextracción con Urtica urens L. en suelos contaminados con plomo, en los últimos 10 años*. Trujillo: Universidad Privada del Norte. Obtenido de <https://hdl.handle.net/11537/34025>

Quincho, C., & Saldaña, V. (2023). *Análisis de la fitoextracción con Urtica urens L. en suelos contaminados con plomo, en los últimos 10 años*. Trujillo: Universidad Privada del Norte. <https://hdl.handle.net/11537/34025>

Rivera, A., & Alarcon, D. (2024). *Bioacumulación de Metales Pesados en las Especies: Euphorbia cyparissias (Lechetrezna), Bacharis tricuneata (Taya) y Epilobium tetragonum (Adefillas) Adaptados en la Desmontera Rumiallana – Yanacancha – Pasco – 2023*. Cerro de Pasco: Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión. Obtenido de <http://repositorio.undac.edu.pe/handle/undac/4049>

- Rivera, A., & Alarcon, D. (2024). *Bioacumulación de Metales Pesados en las Especies: Euphorbia cyparissias (Lechetrezna), Bacharis tricuneata (Taya) y Epilobium tetragonum (Adefillas) Adaptados en la Desmontera Rumiallana – Yanacancha – Pasco – 2023*. Cerro de Pasco: Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión.
<http://repositorio.undac.edu.pe/handle/undac/4049>
- Romero, M., & Bravo, S. (2021). *Estudio del potencial de acumulación de metales pesados de plantas nativas peruanas para la fitorremediación de pasivos mineros*. 2021: Pontificia Universidad Católica del Perú. Obtenido de <http://hdl.handle.net/20.500.12404/19519>
- Romero, M., & Bravo, S. (2021). *Estudio del potencial de acumulación de metales pesados de plantas nativas peruanas para la fitorremediación de pasivos mineros*. 2021: Pontificia Universidad Católica del Perú. <http://hdl.handle.net/20.500.12404/19519>
- Salamanca, Á., Silva, D., Muñoz, J., Sánchez, F., Meléndez, J., & Borda, L. (2023). Fitorremediación con Brassicaceae y Apiaceae en suelos contaminados con metales pesados. *Revista de Biología Tropical*, 1 - 11. doi:
<http://dx.doi.org/10.15517/rev.biol.trop..v71i1.53600>
- Servin, D. (2024). *Efecto de la inoculación de Arthrobacter aurescens, Arthrobacter ilicis y Bacillus simplex en nicotiana glauca para la fitorremediación de suelos contaminados con Mercurio*. Santiago de Querétaro: Universidad Autónoma de Querétaro. <https://ri-ng.uaq.mx/handle/123456789/10358>
- Sonora, H. (2018). El legado de la minería, el riesgo de sus residuos o jales. Biorremediación: el uso de microorganismos para recuperar suelos contaminados por metales pesados. *Nuestra Tierra Divulgación de La Ciencia*, 20 - 29.
https://erno.geologia.unam.mx/uploads/nuestra-tierra/archivos/29/Nuestra_Tierra_No._29_final.pdf
- Ticona, S. (2021). *Capacidad fitorremediadora de Lupinus cuzcensis C.P. sm (Fabaceae) en suelos contaminados por metales pesados en la puna del departamento de Moquegua*.

Moquegua: Universidad Jose Carlos Mariategui.

<https://hdl.handle.net/20.500.12819/1348>

Torrel, R. (2020). *Evaluación de la bioacumulación de plomo en tallo, hojas y coronta de Zea mays en muestras sintéticas*. Lima: Universidad Privada del Norte. Obtenido de <https://hdl.handle.net/11537/24206>

Vizconde, J. (2024). *Eficiencia de la fitorremediación con Dactylis glomerata y Pennisetum clandestinum del relave de la Planta Concentradora de Minerales Santa Rosa de Jangas – Huaraz*. Lima: Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.12672/22255>

ANEXOS

Anexo 1. Evidencia de Sumisión

55759 / Mayhui Chinchercoma et al. / Fitorremediación De Suelo Contaminado Por Relave Minero Con Presencia De Plomo Mediante Stip... Biblioteca de envío

Flujo de trabajo **Publicación**

Envío **Revisión** Editorial Producción

Archivos de envío [Buscar](#)

Nombre	De	Última respuesta	Respuestas	Cerrado
184473-1 karol_mayhui, ARTICULO DE FITORREMIACION DE PLOMO-F.docx	karol_mayhui	November 21, 2025	0	<input type="checkbox"/>

Discusiones previas a la revisión [Añadir discusión](#)

Nombre	De	Última respuesta	Respuestas	Cerrado
Comentarios para el editor/a	karol_mayhui	2025-11-21 12:20 AM	0	<input type="checkbox"/>

Anexo 2. Resolución de Perfil de Proyecto



“AÑO DEL BICENTENARIO, DE LA CONSOLIDACIÓN DE NUESTRA INDEPENDENCIA, Y DE LA
CONMEMORACIÓN DE LAS HEROICAS BATALLAS DE JUNÍN Y AYACUCHO”

RESOLUCIÓN N° 1161-2024/UPeU-FIA-CF-T

Lima, Ñaña 03 de diciembre de 2024

VISTO:

El expediente de Liz Karol Mayhuiri Chinchiercoma, identificado(a) con Código Universitario N° 202012626 y Katia Malu Quispe Colque identificado(a) con Código Universitario N° 201911742, de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Peruana Unión;

CONSIDERANDO

Que la Universidad Peruana Unión tiene autonomía académica, administrativa y normativa, dentro del ámbito establecido por la Ley Universitaria N° 30220 y el Estatuto de la Universidad;

Que la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Peruana Unión, mediante sus reglamentos académicos y administrativos, ha establecido las formas y procedimientos para la aprobación e inscripción del perfil de proyecto de tesis en formato artículo y la designación o nombramiento del asesor para la obtención del título profesional;

Que Liz Karol Mayhuiri Chinchiercoma y Katia Malu Quispe Colque, han solicitado: la inscripción del perfil de proyecto de tesis titulado "Fitorremediación de suelo contaminado por relave minero con presencia de plomo mediante Stipa ichu con enmiendas" y la designación del Asesor, encargado de orientar y asesorar la ejecución del perfil de proyecto de tesis en formato artículo;


Estando a lo acordado en la sesión del Consejo de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Peruana Unión, celebrada el 03 de diciembre de 2024, y en aplicación del Estatuto y el Reglamento General de Investigación de la Universidad;

SE RESUELVE:


Aprobar el perfil de proyecto de tesis en formato artículo titulado "Fitorremediación de suelo contaminado por relave minero con presencia de plomo mediante Stipa ichu con enmiendas" y disponer su inscripción en el registro correspondiente, designar al Dr. Jorge Juvenal Bravo Hualla como ASESOR para que oriente y asesore la ejecución del perfil de proyecto de tesis en formato artículo el cual fue dictaminado por la: MSc. Rose Adeline Callata Chura y el Ing. Enrique Mamani Cuela, otorgándoles un plazo máximo de doce (12) meses para la ejecución.

Regístrese, comuníquese y archívese.




Dra. Erika Inés Acuña Salinas
DECANA




Ph.D. Silvia Pilco Quesada
SECRETARIA ACADÉMICA

cc:
-Interesado
-Asesor
-Dirección General de Investigación
-Archivo

Anexo 3. Fotografías

FOTOGRAFIA N° 01



DESCRIPCION

En la fotografía N° 01, se realizó el muestreo de relaves, los cuales fueron posteriormente trasladados al laboratorio para su análisis.

FOTOGRAFIA N° 02



DESCRIPCION

En la fotografía N° 02, se puede visualizar la construcción de las unidades experimentales.

FOTOGRAFIA N° 03



DESCRIPCION

En la fotografia N° 03, el proceso experimental se llevó a cabo mediante la preparación de diferentes sustratos (relave + humus + suelo agrícola + cal).

FOTOGRAFIA N° 04



DESCRIPCION

En la fotografia N° 04, Traslado de la especie *Stipa ichu*.

FOTOGRAFIA N° 05



DESCRIPCION

En la fotografía N° 05, disposición de los sustratos en las unidades experimentales.

FOTOGRAFIA N° 06



DESCRIPCION

En la fotografía N° 06, se procedió a la disposición de la especie *Stipa ichu* en las unidades experimentales.

FOTOGRAFIA N° 07



DESCRIPCION

En la fotografía N° 07, monitoreo diario y riego de la planta.

FOTOGRAFIA N° 08



DESCRIPCION

En la fotografía N° 08, Se realizó el muestreo de la especie *Stipa ichu* y del sustrato, los cuales fueron posteriormente trasladados al laboratorio para su análisis. Cabe resaltar que este monitoreo se realizó a los 45, 70 y 90 días.