

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA

ESCUELA DE POSGRADO



UNIDAD DE POSGRADO DE LA FACULTAD DE CIENCIAS

AGRARIAS

PROGRAMA DE MAESTRÍA EN CIENCIAS

TESIS:

**USO DE *Polylepis racemosa* Ruiz y Pav. EN LA FITORREMEDIACIÓN
DE LODOS RESULTANTES DEL TRATAMIENTO DE AGUAS ÁCIDAS
DE LA ACTIVIDAD MINERA EN CAJAMARCA, PERÚ**

Para optar el Grado Académico de

MAESTRO EN CIENCIAS

MENCIÓN: GESTIÓN AMBIENTAL

Presentado por:

LENIN ROJAS RODRÍGUEZ

Asesor:

M.Sc. ALEX WILFREDO HUATAY SALDAÑA

Cajamarca, Perú



2026



CONSTANCIA DE INFORME DE ORIGINALIDAD

- Investigador:
Lenin Rojas Rodriguez
DNI: 45435678
Escuela Profesional/Unidad de Posgrado de la Facultad de Ciencias Agrarias. Programa de Maestría en Ciencias, Mención: Gestión Ambiental
- Asesor: M.Sc. Alex Wilfredo Huatay Saldaña
- Grado académico o título profesional
 Bachiller Título profesional Segunda especialidad
 Maestro Doctor
- Tipo de Investigación:
 Tesis Trabajo de investigación Trabajo de suficiencia profesional
 Trabajo académico
- Título de Trabajo de Investigación:
USO DE *Polylepis racemosa* Ruiz y Pav. EN LA FITORREMEDIACIÓN DE LODOS RESULTANTES DEL TRATAMIENTO DE AGUAS ÁCIDAS DE LA ACTIVIDAD MINERA EN CAJAMARCA, PERÚ
- Fecha de evaluación: **13 /04/2026**
- Software antiplagio: TURNITIN URKUND (OURIGINAL) (*)
- Porcentaje de Informe de Similitud: **13%**
- Código Documento: **3117:578075391**
- Resultado de la Evaluación de Similitud:
 APROBADO PARA LEVANTAMIENTO DE OBSERVACIONES O DESAPROBADO

Fecha Emisión: **17/04/2026**

<i>Firma y/o Sello Emissor Constancia</i>	
	
M.Sc. Alex Wilfredo Huatay Saldaña DNI: 43561176	Dr. Wilfredo Poma Rojas DNI: 26719942

* En caso se realizó la evaluación hasta setiembre de 2023

COPYRIGHT© 2026 BY
LENIN ROJAS RODRÍGUEZ
Todos los derechos reservados



PROGRAMA DE MAESTRÍA EN CIENCIAS

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS


Siendo las 15.30 horas, del día 25 de febrero del dos mil veintiséis, reunidos en el Auditorio de la Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional de Cajamarca, el Jurado Evaluador presidido por el **Dr. JUAN EDMUNDO CHÁVEZ RABANAL, MBA. SANTIAGO DEMETRIO MEDINA MIRANDA, M.Sc. LUIS DÁVILA ESTELA** y en calidad de Asesor el **M.Sc. ALEX WILFREDO HUATAY SALDAÑA**, actuando de conformidad con el Reglamento Interno y el Reglamento de Tesis de Maestría de la Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional de Cajamarca, se dio inicio a la Sustentación de la Tesis titulada **"USO DE *Polypepis racemosa* Ruiz y Pav. EN LA FITORREMEDIACIÓN DE LODOS RESULTANTES DEL TRATAMIENTO DE AGUAS ÁCIDAS DE LA ACTIVIDAD MINERA EN CAJAMARCA, PERÚ"**, presentada por el **Bachiller en Ciencias Forestales, LENIN ROJAS RODRÍGUEZ**.

Realizada la exposición de la Tesis y absueltas las preguntas formuladas por el Jurado Evaluador, y luego de la deliberación, se acordó aprobar con la calificación de dieciséis (17) la mencionada Tesis; en tal virtud, el **Bachiller en Ciencias Forestales, LENIN ROJAS RODRÍGUEZ** está apta para recibir en ceremonia especial el Diploma que lo acredita como **MAESTRO EN CIENCIAS** Mención en **GESTIÓN AMBIENTAL**, de la Unidad de Posgrado de la Facultad de Ciencias Agrarias.

Siendo las 17.15 horas del mismo día, se dio por concluido el acto.


.....
M.Sc. Alex Wilfredo Huatay Saldaña
Asesor


.....
Dr. Juan Edmundo Chávez Rabanal
Jurado Evaluador


.....
MBA. Santiago Demetrio Medina Miranda
Jurado Evaluador


.....
M.Sc. Luis Dávila Estela
Jurado Evaluador

DEDICATORIA

A mis queridos padres, José y Dolores, por darme la vida, y estar siempre a mi lado en cada momento. Por su amor, comprensión, cariño y consejos que me brindan cada día, a mis hijos, hermanos, amigos y familiares que están conmigo en cada momento y que han hecho posible cada una de mis metas y logros como lo es el presente trabajo.

AGRADECIMIENTOS

A Dios porque está conmigo, cuidándome y dándome fortaleza para continuar, a mi familia quienes a lo largo de mi vida han velado por mi bienestar y educación constituyéndose en una pieza fundamenta en mi vida.

A mi asesor de tesis el M.Sc. ALEX WILFREDO HUATAY SALDAÑA, por aceptarme realizar esta tesis bajo su dirección, por su apoyo y confianza brindada durante el desarrollo del mismo.

A mis compañeros de trabajo y todas aquellas personas que han contribuido su valioso tiempo, su amistad desinteresada y consejo oportuno.

A los docentes de la Escuela de Post Grado de la Universidad Nacional de Cajamarca por el servicio brindado, por su amistad, confianza y profesionalismo mostrado como educadores y forjadores de personas de bien.

A todos y cada uno de ellos, infinitas gracias.

El que planta árboles, ama a los demás
además de a sí mismo

Thomas Fuller

ÍNDICE

	Pág.
RESUMEN	xiii
ABSTRACT	xiv
CAPÍTULO I	1
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO II	3
MARCO TEÓRICO	3
2.1. Antecedentes de la investigación.....	3
2.2. Bases teóricas	6
2.2.1. Fitorremediación y Fitoestabilización	6
2.2.2. Especies Fito remediadoras	11
2.2.3. Ecofisiología P. racemosa "quinual" "queñua"	13
2.2.4. Química de Suelos y Lodos Mineros (HDS)	14
2.2.5. Dinámica de Metales Pesados (Zn, Cu, Cd).....	17
2.2.6. Aguas ácidas de mina	20
2.3. Definición de términos básicos.....	22
2.3.1. Fitorremediación de suelos.....	22
2.3.2. Lodos de alta densidad (HDS).....	23
2.3.3. Aguas ácidas de mina (AMD)	23
2.3.4. Metales pesados en el suelo.....	23

CAPÍTULO III	24
MATERIALES Y MÉTODOS	24
3.1. Ubicación.....	24
3.2. Materiales y equipos	24
3.3. Metodología.....	24
3.3.1. Fase de campo	25
3.3.2. Fase de gabinete.....	31
CAPÍTULO IV	33
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	33
4.1. Concentración de metales pesados en <i>P. racemosa</i> , turba y lodo	33
4.2. Supervivencia de plantones de <i>P. racemosa</i>	36
4.3. Acumulación y extracción de Cd, Cu y Zn en la biomasa aérea y radicular de <i>P. racemosa</i>	41
4.3.1. Acumulación de metales pesados en la biomasa aérea de <i>P. racemosa</i>	43
4.3.2. Acumulación de metales pesados en la biomasa radicular de <i>P. racemosa</i>	45
4.3.3. Factor de Bioconcentración (FBC) en <i>P. racemosa</i>	48
4.3.4. Factor de Translocación (FT) en <i>P. racemosa</i>	49
CAPÍTULO V	51
CONCLUSIONES	51
CAPÍTULO VI	52
REFERENCIAS	52
CAPÍTULO VII	79
ANEXOS	79

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de una planta de tratamiento convencional para aguas ácidas	22
Figura 2. Ubicación del área de plantaciones de <i>P. racemosa</i> – Porcón Alto.....	26
Figura 3. Árboles madre y recolección de esquejes de <i>P. racemosa</i> del C.P. de Porcón Alto	27
Figura 4. Composición del sustrato turba y lodo.....	27
Figura 5. Ubicación de la planta de tratamiento de aguas ácidas – Minera La Zanja	28
Figura 6. Ubicación del vivero de la Agencia Agraria de Cajamarca – Centro Poblado de Tartar	29
Figura 7. Siembra de esquejes de <i>P. racemosa</i> en los diferentes tratamientos	30
Figura 8. Concentración inicial de Cd, Cu y Zn en lodos Vs ECA-suelo	34
Figura 9. Evaluación de supervivencia de los plantones de <i>P. racemosa</i>	37
Figura 10. Porcentaje de supervivencia de los plantones de <i>P. racemosa</i>	37
Figura 11. Evaluación de crecimiento de los plantones de <i>P. racemosa</i>	40
Figura 12. Crecimiento de plantones de <i>P. racemosa</i> en función de los 5 tratamientos.....	40
Figura 13. Acumulación inicial y final de Cd, Cu y Zn en <i>P. racemosa</i>	42
Figura 14. Acumulación de Cd, Cu y Zn (mg/kg) en la biomasa aérea de <i>P. racemosa</i>	44
Figura 15. Acumulación de Cd, Cu y Zn (mg/kg) en la biomasa radicular de <i>P. racemosa</i>	46
Figura 16. Acumulación de metales en la biomasa aérea y radicular de <i>P. racemosa</i>	48

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Tratamientos estudiados	25
Tabla 2. Concentración inicial de metales pesados en <i>P. racemosa</i> , turba y lodo	34
Tabla 3. Parámetros fisicoquímicos en turba y lodo.....	35
Tabla 4. Análisis de varianza (ANOVA) para la supervivencia de plantones <i>P. racemosa</i>	38
Tabla 5. Análisis de varianza (ANOVA) para el crecimiento de plantones de <i>P. racemosa</i>	41
Tabla 6. Extracción y acumulación de Cd, Cu y Zn en plantones de <i>P. racemosa</i>	43
Tabla 7. Análisis de varianza (ANOVA) para la acumulación de Cd, Cu y Zn en la biomasa aérea de <i>P. racemosa</i>	44
Tabla 8. Prueba de rango múltiple LSD para la acumulación de Cd, Cu y Zn en la biomasa aérea de <i>P. racemosa</i>	45
Tabla 9. Análisis de varianza (ANOVA) para la acumulación de Cd, Cu y Zn en la biomasa radicular de <i>P. racemosa</i>	46
Tabla 10. Prueba de rango múltiple LSD para la acumulación de Cd, Cu y Zn en la biomasa radicular de <i>P. racemosa</i>	47
Tabla 11. Factor de bioconcentración (FBC) de metales pesados en <i>P. racemosa</i>	49
Tabla 12. Factor de translocación (FT) de metales pesados en <i>P. racemosa</i>	50

LISTA DE ABREVIATURAS

AAM	: Aguas ácidas de mina
AMD	: Agua ácida de mina
EPA	: Agencia para la Protección Ambiental
EPT	: Elementos potencialmente tóxicos
FBC	: Factor de bioconcentración
FT	: Factor de traslocación
INIA	: Instituto Nacional de Innovación Agraria
HDS	: Lodos de alta densidad
pH	: Potencial de Hidrogeno
PTAA	: Planta de tratamiento de agua acida
SENHAMI	: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú
SESA	: Servicio Silvoagropecuario
T1 T2 T3 T4 T5	: Tratamientos
LSD	: Diferencias Mínimas Significativas
ANOVA	: Análisis de Varianza

RESUMEN

La presente investigación surgió con el propósito de evaluar el uso de plantones de *P. racemosa*, con fines de fitorremediación de lodos generados del tratamiento de aguas ácidas de mina. Se evaluaron cinco tratamientos: T1: 25 % lodo + 75 % turba, T2: 50 % turba + 50 % lodo, T3: 100 % lodo, T4: 75 % lodo + 25 % turba y T5: 100 % turba (testigo). Se determinó la presencia de 18 metales pesados en el lodo, turba y plantones de *P. racemosa*, de los cuales 15 se encontraron con concentraciones por debajo de los estándares de calidad ambiental. Sin embargo, el lodo evidenció niveles críticos de contaminación al superar el ECA-suelo en Cu (2 493.78 mg/kg), Cd (15.52 mg/kg), y Zn (1 494.53 mg/kg), lo que representa un exceso del 3 400 %, 1 009 % y 400 % respectivamente. El porcentaje de supervivencia de *P. racemosa* osciló entre 66 % y 100 %, sin diferencias estadísticas significativas entre tratamientos. La mayor acumulación de metales pesados en el sistema radicular se obtuvo en el T3, con 318 mg/kg de Cu, 84 mg/kg de Zn y 2 mg/kg de Cd, mientras que en la biomasa aérea fue en el T5 con 22 mg/kg de Zn y 1 mg/kg de Cd, mostrando un comportamiento predominantemente acumulador en las raíces. Los valores de $FBC \geq 1$ para Cu y Zn y $FT \geq 1$ para Cd, Cu y Zn ambos en el tratamiento T5, indican que *P. racemosa* posee capacidad de fitoextracción para Cd, Cu y Zn bajo ciertas condiciones, aunque su tendencia general sugiere un comportamiento combinado de fitoextracción y fitostabilización.

Palabras clave: *P. racemosa*, metales pesados, bioconcentración, translocación, fitorremediación, bioacumulación.

ABSTRACT

This research was undertaken to evaluate the use of *P. racemosa* seedlings for the phytoremediation of sludge generated from the treatment of acid mine drainage. Five treatments were evaluated: T1: 25 % sludge + 75 % peat, T2: 50 % peat + 50 % sludge, T3: 100 % sludge, T4: 75 % sludge + 25 % peat, and T5: 100 % peat (control). Eighteen heavy metals were detected in the sludge, peat, and *P. racemosa* seedlings, of which 15 were found to be below environmental quality standards. However, the sludge showed critical levels of contamination, exceeding the soil environmental standards (ECA-soil) for Cu (2 493.78 mg/kg), Cd (15.52 mg/kg), and Zn (1 494.53 mg/kg), representing excesses of 3 400 %, 1 009 %, and 400 %, respectively. The survival rate of *P. racemosa* ranged from 66 % to 100 %, with no statistically significant differences between treatments. The highest accumulation of heavy metals in the root system was observed in treatment T3, with 318 mg/kg of Cu, 84 mg/kg of Zn, and 2 mg/kg of Cd, while in the aboveground biomass it was observed in treatment T5, with 22 mg/kg of Zn and 1 mg/kg of Cd, demonstrating a predominantly root-accumulating behavior. The values of $FBC \geq 1$ for Cu and Zn and $FT \geq 1$ for Cd, Cu and Zn both in treatment T5, indicate that *P. racemosa* has phytoextraction capacity for Cd, Cu and Zn under certain conditions, although its general trend suggests a combined behavior of phytoextraction and phytostabilization.

Keywords: *P. racemosa*, heavy metals, bioconcentration, translocation, phytoremediation, bioaccumulation.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

La minería constituye un pilar importante para la economía global, pero su ejecución conlleva impactos ambientales significativos. Al respecto, Aduvire (2018) identifica la generación de drenajes ácidos de mina (DAM) como uno de los pasivos más críticos, originado por la interacción oxidativa entre minerales sulfurados, oxígeno y agua. Este fenómeno, cuya cinética se ve intensificada por la catálisis bacteriana, produce efluentes de carácter corrosivo. En consecuencia, el autor advierte que la descarga de estos vertidos degrada drásticamente los ecosistemas acuáticos, comprometiendo la integridad química del recurso hídrico y la estabilidad de su biodiversidad debido a la carga de metales disueltos.

El tratamiento de efluentes ácidos se fundamenta en elevar el pH para neutralizar el ácido presente y promover la precipitación de los metales disueltos. Estos precipitados metálicos constituyen los denominados “lodos”, los cuales requieren una disposición final ambientalmente segura para evitar riesgos de contaminación (Torrico Garcés, 2022). Existen diversas metodologías para la descontaminación ambiental, clasificados generalmente según su naturaleza física, química o biológica. En el ámbito de las tecnologías biológicas, la fitorremediación aprovecha las facultades de absorción y metabolismo de las plantas para tratar sitios afectados (Delgadillo-López et al., 2011). Asimismo, es una de las principales técnicas actualmente disponibles para la remediación de suelos contaminados y se basa en el uso de plantas para remover, inmovilizar o transformar los contaminantes orgánicos e inorgánicos presentes en el suelo y en el agua (Silva Mori, 2022). Además, destaca el bajo costo, su aplicabilidad a gran escala y su naturaleza ecológica, lo que la convierte en una

opción viable frente a los métodos convencionales de tratamiento de residuos mineros (Wenzel, 2009).

Dentro de este enfoque, se ha propuesto en este estudio utilizar plantones de la especie *P. racemosa* que ha despertado interés debido a su adaptabilidad a condiciones extremas y su capacidad potencial de acumular metales pesados en sus tejidos (Paredes, 2018; Ramírez et al., 2021). El *P. racemosa*, originario de los Andes, se ha utilizado en proyectos de reforestación en áreas afectadas por la minería demostrando eficacia en la fitorremediación de suelos y lodos contaminados por actividades mineras (Kessler y Schmidt-Lebuhn, 2006; Valladares Perez, 2019).

Por tanto, el objetivo general fue Evaluar el uso de plantones de *P. racemosa* con fines de fitorremediación de lodos generados del tratamiento de aguas ácidas de mina en Cajamarca, empleando como sustrato lodo y turba en condiciones de vivero.

Para ello, se formularon los siguientes objetivos específicos: a) Determinar la concentración inicial de metales pesados en el lodo, turba y *P. racemosa*, b) Evaluar el porcentaje de supervivencia de *P. racemosa* sembrados en sustratos con diferentes proporciones de lodos y turba, c) Cuantificar la capacidad de acumulación y extracción de metales pesados (Cu, Zn, Cd) en la biomasa aérea y radicular de plantones de *P. racemosa*.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la investigación

Amezcueta et al. (2020) desarrollaron el estudio titulado “Fitorremediación de residuos de minas contaminados con metales pesados”, con el propósito de cuantificar la extracción de elementos como Cu, Zn, Mn, Cd, Ni y Pb mediante el uso de *Lolium perenne* y *Poa pratensis* en un jal de mina. Los investigadores reportaron que la aplicación de composta como enmienda orgánica en un jal de mina fue determinante para optimizar la germinación y el incremento de la biomasa vegetal. En cuanto a la eficiencia extractiva, el estudio evidenció que el orden de acumulación varió según la especie y el elemento, destacando una mayor afinidad por el Cd y Mn en *L. perenne*, frente al Ni y Mn en *P. pratensis*. Finalmente, se concluyó que la mayor concentración de estos metales pesados se localizó en el tejido radicular, lo que sugiere un mecanismo de fitoestabilización bajo las condiciones evaluadas.

Guzmán (2021) llevó a cabo un estudio sobre la fitorremediación de suelos contaminados con arsénico, cobre y plomo utilizando *Echeveria elegans* y *Crassula ovata*. Los resultados mostraron que ambas plantas podían acumular y estabilizar estos metales en suelos con diferentes niveles de nutrientes. Se determinó que las plantas eran hipertolerantes según sus factores de bioconcentración y traslocación, lo que indica su potencial para ser empleadas en tratamientos de fitorremediación, siendo efectivas en la fitoestabilización a altas concentraciones de contaminantes.

De la Cruz (2021) en su trabajo de investigación titulado “Niveles de Contenido de Plomo y Zinc en órganos no reproductivos de *Polylepis sp.* en tres localidades de Pasco”, determinó concentraciones diferenciadas de Pb y Zn según el tejido analizado. Los niveles de plomo en *Poylepis sp.* fue de 103.80 ppm, con una distribución específica de 109.89 ppm en hojas, 43.33 ppm en tallos y 158.18 ppm en las raíces. Respecto al zinc, se reportó 179.84 ppm a nivel de la especie, con una concentración de 193,98 ppm en hojas; 50,04 ppm en tallo y 295,51 ppm en las raíces. Concluyendo que *Polylepis sp.*, posee una capacidad de fitoacumulación excepcional para el plomo y zinc, la cual supera significativamente a otras especies forestales.

Munive et al. (2020) analizaron la capacidad del girasol para absorber Pb y Cd en suelos contaminados tratados con compost y vermicompost. Los resultados mostraron que la planta acumuló principalmente los metales en sus raíces, sin diferencias significativas en la acumulación de Pb y Cd entre tallos, hojas y flores. Los autores concluyen que la incorporación de enmiendas orgánicas resultó determinante al facilitar la solubilización de los metales y potenciar el desarrollo integral del cultivo. Esta optimización de las condiciones del sustrato se reflejó en los índices de eficiencia, donde los valores del Factor de Bioconcentración (FBC) mostraron un desempeño superior para el Cd (0,53 - 0,66) en comparación con el Pb (0,07 - 0,08). Asimismo, los resultados del Factor de Translocación (FT) evidenciaron que el girasol opera eficazmente como un agente fitoestabilizador, logrando niveles destacados mediante el uso de vermicompost (Pb: 1,2; Cd: 1,4) y compost (Pb: 0,8; Cd: 1,2).

Huaranga et al. (2021) cuantificaron la absorción de los metales pesados Pb y Cd con la especie *Lolium multiflorum* L. (Poaceae), utilizando suelos contaminados por material de relave que contienen metales pesados, provenientes de la zona de Samne, La Libertad. Donde determinaron una tendencia jerárquica de $Pb > Cd$. En dicha evaluación, se observó que el plomo presentó una predominancia constante en la absorción a los 65, 95 y 125 días de la fase experimental

En su estudio sobre la influencia de los metales pesados en forrajes del pasivo ambiental Minera Azulcocha. Veliz Ávila (2022) evaluó la presencia de arsénico, manganeso y zinc mediante espectrometría de emisión óptica de plasma acoplado inductivamente (ICP-OES). La investigación, realizada bajo los estándares de CERPER, determinó que los niveles de estos elementos en el tejido vegetal exceden los límites máximos permisibles. Asimismo, el autor concluyó que las especies evaluadas operan bajo un mecanismo de exclusión, dada su capacidad de gestionar la bioacumulación frente a las altas concentraciones detectadas en el entorno.

Vizconde (2023), realizó un estudio de fitorremediación de suelos contaminados por relaves mineros a través de *Dactylis glomerata* y *Pennisetum clandestinum*, logró resultados donde indican que las dos especies vegetales tienen eficiencia fitorremediadora por exclusión superior al 99 % ($p > 0.001$) inmovilizando los metales bajo la forma no soluble. Así mismo, ambas especies exhiben una notable capacidad para inmovilizar elementos metálicos en el sistema radicular y el área rizosférica, (como metal no disuelto), lo que permite clasificar como plantas fitoestabilizadoras exclusoras.

Gama (2019) en su estudio “La Fitorremediación como alternativa en la recuperación de suelos afectados con desmontes de construcción – Cajabamba”; obtuvo que el Cr presentó una disminución del 28,62 % en el cultivo de maíz (*Zea mays* L.), el Cd y Pb lograron una disminución mayor al 80 % en la taya (*Tara spinosa* (Molina) Britton & Rose), en el Rye grass (*Lolium multiflorum*) y trébol rojo (*Trifolium pratense* L.).

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Fitorremediación y Fitoestabilización

La fitorremediación, conocida como botanoremediación, remediación vegetativa, remediación verde o agrorremediación, está basada en el uso de plantas para remediar y revegetar sitios contaminados con metales pesados (Santos et al., 2023). La fitorremediación abarca varios procesos, entre ellos la fitoextracción (captación y acumulación de contaminantes en los tejidos vegetales), la fitoestabilización (inmovilización de contaminantes en la zona radicular), la fitodegradación (descomposición de contaminantes por enzimas vegetales), la fitovolatilización (liberación de contaminantes a la atmósfera) y la rizofiltración (eliminación de contaminantes del agua a través de las raíces) (Ashraf et al., 2019; Raza et al., 2020; Yan et al., 2020; Kafle et al., 2022; Raklami et al., 2022; Aryal, 2024; Di Stasio et al., 2025).

A. Mecanismos de tolerancia

A continuación, se describen los principales mecanismos de tolerancia de las plantas a los metales pesados:

a. Evitar o reducir la entrada del metal a la planta

- **Barreras físicas y químicas en la rizosfera:** exudados radicales, asociación con micorrizas y cambios de pH inmovilizan metales cerca de la raíz y reducen su absorción (Ghugue et al., 2023; Kushwaha et al., 2016; Ghori et al., 2019; Thakur et al., 2021; Mohamed et al., 2025).
- **Disminución de la captación o aumento del eflujo:** regulación de transportadores en membrana plasmática (NRAMP, HMA, ABC, etc.) que reducen la entrada o expulsan iones al exterior (Ghugue et al., 2023; Shivappa et al., 2025; Singh et al., 2016; Thakur et al., 2021; Feki et al., 2021)

b. Secuestro y detoxificación del metal absorbido en la planta

- **Fijación en pared celular y apoplasto:** unión a pectinas, lignina y otros polisacáridos; es una forma importante de “tolerancia por exclusión” (Thakur et al., 2021; Ghugue et al., 2023; Shivappa et al., 2025).
- **Quelación en el citosol:** síntesis de fitoquelatinas, metalotioneínas, glutatión y ácidos orgánicos que forman complejos no tóxicos con Cd, Pb, As, Zn, etc. (Hossain et al., 2012; Ejaz et al., 2023; Ghugue et al., 2023).
- **Secuestro en vacuolas:** transportadores del tonoplasto (HMA, CDF/MTP, ABC) bombean los complejos metal–quelante al interior de la vacuola, alejándolos de sitios sensibles (Feki et al., 2021; Skuza et al., 2022; Shivappa et al., 2025).

c. Defensa frente al estrés oxidativo

- Los metales generan especies reactivas de oxígeno (ROS) que dañan membranas, proteínas y ADN. En respuesta las plantas generan enzimas antioxidantes: SOD, CAT, peroxidases, APX, GR y también generan antioxidantes no enzimáticos: glutatión, ascorbato, prolina, fenoles, tocoferoles, melatonina (Hossain et al., 2012; Singh et al., 2016; Ejaz et al., 2023; Ningombam et al., 2024; Shivappa et al., 2025).

d. Respuesta molecular y señalización

- Percepción y señalización vía Ca^{2+} , ROS, óxido nítrico, MAPK y fitohormonas (ABA, etileno, auxinas, jasmonatos, SA) que regulan genes transportadores, quelantes y antioxidantes. Regulación por factores de transcripción y miRNAs que ajustan la expresión de genes de tolerancia y de hiperacumulación (Ghugre et al., 2023; Shivappa et al., 2025).

B. Índices de eficiencia

El factor de transferencia suelo-planta es un componente importante de la exposición humana a metales a través de la cadena alimentaria y puede revelar la biodisponibilidad de metales pesados en los suelos estudiados (Rai et al., 2019). Para calcular la absorción y distribución de metales en las distintas partes de la planta (TP), se utilizan el factor de bioconcentración (FBC), el factor de bioacumulación (FBA) y el factor de translocación (TF) (Aziz et al., 2023).

a. Factor de bioconcentración (FBC)

La magnitud de una planta para acumular metales del suelo se puede estimar utilizando el factor de bioconcentración (FBC). El FBC se calcula utilizando la siguiente ecuación (Zheng et al., 2020):

$$\text{FBC} = [\text{Metal-aéreo o raíz}]/[\text{Metal-suelo}]$$

Donde: Metal-aéreo o raíz: es la concentración de metales de parte aérea (tallos, hojas, inflorescencia) y concentración de Metal-suelo: es la concentración de metales en el suelo, ambos en mg/kg.

El factor de bioconcentración (FBC) es la relación entre el contenido de metal en las diferentes partes de la planta y el del suelo. Un FBC mayor a 1,00 sugiere que la planta puede acumular metales, mientras que un $\text{FBC} \leq 1,00$ implica que la planta solo puede absorber metales pesados (Yan et al., 2020).

b. Factor de translocación (TF)

El TF se conoce como la facultad de la planta para transferir metales desde las raíces a las partes aéreas. El TF se calculó en función de la relación entre la concentración de metal en los brotes de la planta y en las raíces, utilizando la siguiente ecuación (Radovanovic et al., 2020):

$$\text{TF} = [C \text{ Aéreo}]/[C \text{ Raíz}]$$

Donde: $C_{\text{Aéreo}}$: es la concentración de metales de la parte aérea que comprende tallos, hojas e inflorescencia y $C_{\text{Raíz}}$: es la concentración de metales en la raíz, ambos en mg/kg.

Este índice proporciona una interpretación cuantitativa de las diferencias relativas en la biodisponibilidad de metales para las plantas. Un valor de TF inferior a 1 indica que la planta tiene potencial de fitoestabilización, donde el metal se inmoviliza en las raíces, impidiendo su translocación a los brotes. En cambio, un valor de TF superior a 1 indica que los metales se translocan eficazmente de las raíces a los brotes (Ramírez et al., 2021). Por lo tanto, el TF puede proporcionar información valiosa sobre los riesgos potenciales asociados a la contaminación por metales en los sistemas suelo-planta y es un parámetro importante para evaluar el impacto ambiental de los metales pesados (Aziz et al., 2023).

c. **Factor de bioacumulación (FBA)**

El factor de bioacumulación (BAF) es un índice importante para comprender el potencial de las plantas para acumular metales pesados del suelo en sus partes comestibles. Este índice refleja el grado de bioacumulación de metales en las plantas en relación con su concentración en el suelo, lo cual puede ser útil para evaluar la seguridad del consumo de cultivos alimentarios cultivados en suelos contaminados (Radovanovic et al., 2020). El valor de BAF se calcula de la siguiente manera:

$$\text{BAF} = C_{\text{parte comestible}} / C_{\text{suelo}}$$

C. **Fitoestabilización vs. Fitoextracción**

- a. **Fitoestabilización:** las especies leñosas o de raíces profundas inmovilizan los metales en las raíces y la rizosfera, reduciendo la lixiviación y la dispersión sin necesariamente eliminar los metales del sitio (Mahar et al., 2016; Cristaldi et al., 2017; Ashraf et al., 2019; Zhakypbek et al., 2024).

- b. Fitoextracción:** las plantas acumulan metales en los brotes cosechables; funciona mejor con especies que combinan tolerancia a los metales, alta concentración de metales en los brotes y alta biomasa (Yan et al., 2020; Sharma et al., 2023; Wan et al., 2024).

2.2.2. Especies Fito remediadoras

Las plantas fito remediadoras tienen la capacidad de actuar sobre diversos contaminantes, incluyendo solventes, plaguicidas, hidrocarburos poliaromáticos, metales pesados, explosivos, elementos radioactivos y fertilizantes. Estos organismos vegetales pueden remover, transferir, estabilizar, descomponer o degradar dichas sustancias presentes en suelos, sedimentos y agua, facilitando su biodisponibilidad para la absorción vegetal (Peña y Beltrán, 2019).

La selección de especies vegetales útiles en la remediación, dependerán de las variables de interés a evaluar como la concentración de contaminantes en la parte aérea, raíz y los factores de bioacumulación. De esta manera, si se escoge la fitoestabilización para un proceso de remediación las plantas deben ser exclusoras de contaminantes en su parte aérea, de modo que la mayor concentración de contaminantes esté inmovilizada en la rizosfera o en la raíz, en cambio si se elige un proceso de fitoextracción lo conveniente es utilizar plantas que acumulen altas concentraciones de elementos potencialmente tóxicos (EPT) en la parte aérea (González et al., 2017).

Las especies de plantas fitorremediadoras se agrupan:

A. Hiperacumuladoras

Plantas como *Alyssum bertolonii* (níquel), *Noccaea caerulescens* (zinc, cadmio) y *Armeria maritima* (cobre, plomo) pueden absorber y tolerar altas concentraciones de metales en sus tejidos, lo que las hace ideales para la fitoextracción (Antoniadis et al., 2020; Hosseinniaee et al., 2022; Kafle et al., 2022; Zhakypbek et al., 2024).

B. Plantas acuáticas

El jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*), la lechuga de agua (*Pistia stratiotes*) y la lenteja de agua (*Lemna minor*) son eficaces para eliminar metales pesados del agua debido a su rápido crecimiento y alta absorción de metales (Ali et al., 2020; Pang et al., 2023).

C. Pastos y especies herbáceas

Los miembros de la familia Poaceae (por ejemplo, *Phragmites australis*, *Cynodon dactylon*), *Artemisia vulgaris* y *Achillea millefolium* se utilizan ampliamente por su alta biomasa y adaptabilidad (Leguizamo et al., 2017; Antoniadis et al., 2020; Ranauda et al., 2025).

D. Especies invasoras y nativas

Las plantas invasoras (por ejemplo, la maleza Crofton, *Calotropis procera*) y las especies nativas adaptadas a las condiciones locales pueden ser eficaces, especialmente en entornos difíciles (Leguizamo et al., 2017; Prabakaran et al., 2019; Khan et al., 2023; Zhakypbek et al., 2024).

2.2.3. Ecofisiología *P. racemosa* "quinual" "queñua"

A. Resiliencia altoandina

Los bosques de *Polylepis* en los Andes centrales del Perú permanecen en ambientes hostiles debido a su ubicación hasta los 4 000 m de altitud (Cano et al., 2021). *P. racemosa* es un árbol andino de crecimiento relativamente rápido y abundante follaje, con rasgos funcionales adaptados a ambientes fríos y a menudo húmedos de gran altitud, contribuye a funciones ecológicas como la protección de las fuentes de agua y la prevención de la erosión del suelo (Haro et al., 2018; Guamba et al., 2021). El rango altitudinal de la *P. racemosa* está entre 1 800 a 5 000 m s.n.m. (Reynel y Marcelo, 2009).

B. Propagación por esquejes

P. racemosa responde bien a las técnicas estándar de corte de madera dura o semidura en viveros de gran altitud, lo que permite la producción a gran escala. La longitud del esqueje y altitud del vivero afectan al rendimiento; los esquejes más largos suelen almacenar más reservas y enraízan mejor, especialmente en condiciones de frío (Gualavisí Quimbiamba, 2008; Haro et al., 2018). Utilizar material juvenil, utilizar la aplicación de reguladores de crecimiento, mantener los esquejes en un ambiente protegido y húmedo (nebulización o sombreado) con buena higiene para reducir la desecación y la infección por agentes patógenos incrementa los rendimientos en la propagación vegetativa de especies vegetales (Stuepp et al., 2018)

C. Capacidad acumuladora

Estudios demuestran que *P. racemosa* es capaz de sobrevivir y crecer en sustratos con presencia de metales pesados como arsénico (As), cadmio (Cd), cobre (Cu), plomo (Pb) y zinc (Zn), presentando una acumulación significativa principalmente en el sistema radicular, además de mostrar un buen desarrollo vegetativo durante el periodo experimental, evidenciando su capacidad de adaptación a suelos con presencia de metales pesados (Paredes, 2018; Grabiell y Taipe, 2024).

2.2.4. Química de Suelos y Lodos Mineros (HDS)

A. Proceso HDS (Lodos de alta densidad)

El proceso HDS es una tecnología mejorada de neutralización utilizando cal, ampliamente utilizada para tratar el drenaje ácido de minas (DAM) y otros efluentes que contienen metales. Su objetivo principal es eliminar los metales y neutralizar la acidez, generando al mismo tiempo un lodo mucho más denso y de menor volumen que el obtenido con el tratamiento convencional con cal (Torrico Garcés, 2022). El proceso funciona por:

- a. **Neutralización en dos etapas con recirculación de lodos:** una porción de lodo previamente formado se mezcla con cal (u otro álcali) y luego se pone en contacto con agua ácida de la mina. Este lodo recirculado proporciona núcleos para la nucleación heterogénea y la coprecipitación de hidróxidos metálicos y yeso.
- b. **Control del pH por etapas:**
 - Etapa I: $\text{pH} \approx 4\text{--}4,5$ para oxidar el Fe^{2+} e iniciar la precipitación de Fe/yeso.
 - Etapa II: $\text{pH} \approx 9\text{--}10$ para la eliminación completa de metales (Fe, Zn, Cu, etc.)

En este contexto, el proceso HDS produce lodos más densos y menos voluminosos en comparación con los métodos convencionales, lo que mejora su manejo y reduce las dificultades de eliminación (Mackie y Walsh, 2015; Sukati et al., 2018; Kuyucak, 2021; Gastañadui-Cruz et al., 2024).

B. Biodisponibilidad de metales

La disponibilidad de metales en el suelo, o su biodisponibilidad, determina cuánto metal puede ser absorbido por las plantas o microorganismos, está controlada principalmente por el pH (mayor acidez aumenta la solubilidad), materia orgánica, tipo de arcilla, potencial redox, iones complejos disueltos, formas adsorbidas, precipitados y soluciones sólidas en minerales y materia orgánica (Li et al., 2022; Xu et al., 2022; Anaya-Raymundo et al., 2025).

a. Principales factores del suelo que controlan la biodisponibilidad

- **pH:** Generalmente es la variable principal. Un pH más bajo aumenta la solubilidad y la biodisponibilidad de muchos metales catiónicos (Cd, Zn, Cu, Ni, Pb, Mn). Un pH más alto favorece la sorción/precipitación y reduce la absorción (Violante et al., 2010; Abdu et al., 2016; Adamczyk-Szabela y Wolf, 2022; Xu et al., 2022).
- **Componentes del suelo:** Las arcillas, los óxidos de Fe/Mn y la materia orgánica adsorben o coprecipitan metales, lo que generalmente disminuye su movilidad y biodisponibilidad (Violante et al., 2010; Li et al., 2024; Angon et al., 2024).
- **Condiciones redox (Eh):** En suelos inundados/reducidos, los sulfuros metálicos pueden precipitar, reduciendo drásticamente la solubilidad; la oxidación puede

removilizar metales o cambiar sus formas tóxicas (por ejemplo, Cr (VI) frente a Cr (III), As(V) frente a As (III)) (Violante et al., 2010; Shahid et al., 2017; Wani et al., 2022).

- **Ligandos y complejación:** El carbono orgánico disuelto, los exudados radiculares, los ácidos húmicos/fúlvicos y los aniones inorgánicos (Cl^- , SO_4^{2-} , PO_4^{3-}) forman complejos que pueden movilizar o inmovilizar metales (Violante et al., 2010; Abdu et al., 2016; Li et al., 2022; Rashid et al., 2023).
- **Microorganismos y raíces:** El metabolismo microbiano y los procesos de la rizosfera alteran el pH, el estado redox y la complejación, modificando así la biodisponibilidad para las plantas y los microbios (Violante et al., 2010; Abdu et al., 2016; Caporale et al., 2016; Li et al., 2022; Wieczorek et al., 2023).

C. Sustratos alternativos

La turba es un sustrato estándar en viveros de producción de plántulas debido a su elevada de retención de agua, aireación y capacidad de intercambio catiónico; sin embargo, su extracción plantea serias preocupaciones ambientales. La turba mejora la retención de agua, la aireación y la amortiguación de nutrientes, proporcionando un sustrato estable, de baja salinidad y ligeramente ácido, ideal para plántulas y cultivos en contenedores. En hortalizas, la turba pura o la mezcla de turba y vermicompost (1:1) produjeron el mayor rendimiento y biomasa en cultivos sin suelo. En ensayos de vivero, las mezclas a base de turba suelen superar a muchas alternativas en cuanto al crecimiento inicial y la asignación de nutrientes (Barbaro et al., 2015; Arévalo et al., 2016; Erdal et al., 2023; Rotowa et al., 2025).

La turba y los materiales derivados de la turba se estudian ampliamente como enmiendas de bajo costo y medios filtrantes para controlar los contaminantes en los relaves mineros, los lodos de alta densidad y los drenajes mineros ácidos/neutros. Sus funciones principales son adsorber metales/metaloideos, facilitar la neutralización y apoyar el tratamiento pasivo (biofiltros, humedales, cubiertas reactivas). Los sistemas de turba/humedales eliminan los metales pesados de manera eficiente con un bajo mantenimiento (Halim et al., 2020; Frostman, 2020).

Los agentes humus-turba (PHA) derivados de la turba neutralizan eficazmente el drenaje ácido de minas (AMD) y se unen a una amplia gama de metales, cumpliendo con los estándares de calidad del agua a bajas dosis (Bogush et al., 2016; Bhuyan et al., 2021).

2.2.5. Dinámica de Metales Pesados (Zn, Cu, Cd)

Los metales pesados en el suelo experimentan complejos procesos dinámicos que determinan su movilidad, biodisponibilidad y riesgo ambiental. Esta dinámica está determinada por interacciones químicas, físicas y biológicas, así como por factores antropogénicos y naturales. Los procesos clave incluyen la adsorción/desorción, la complejación, las reacciones redox y la lixiviación, todos ellos influenciados por propiedades del suelo como el pH, la materia orgánica, la textura y la mineralogía (Huang et al., 2020; Kicińska et al., 2021; Liu et al., 2022; Li et al., 2025).

Entre los principales procesos que rigen la dinámica de los metales pesados tenemos:

A. Sorción/Desorción

Los metales pesados se unen a los componentes del suelo (minerales arcillosos, materia orgánica, óxidos, microorganismos) mediante adsorción y pueden liberarse mediante desorción. Este proceso está muy influenciado por el pH del suelo, la materia orgánica y la presencia de iones competidores (Caporale y Violante, 2016; Pikula y Stępień, 2021; Li et al., 2022; Yu et al., 2023).

B. Complejación y precipitación

Los metales pueden formar complejos con ligandos orgánicos o inorgánicos o precipitar como compuestos insolubles, lo que reduce su movilidad (Caporale y Violante, 2016; Wan et al., 2024; Yu et al., 2025).

C. Reacciones de oxidación-reducción (redox)

Las condiciones redox del suelo, especialmente en suelos inundados o anegados, pueden alterar la especiación y la movilidad de los metales. Por ejemplo, las condiciones reductoras pueden aumentar la solubilidad del arsénico y disminuir la del cadmio (Uchimiya et al., 2020; Wan et al., 2024).

D. Lixiviación y transporte

Las precipitaciones, el riego y la textura del suelo afectan el movimiento descendente de los metales, los suelos más ligeros y las condiciones ácidas promueven una mayor lixiviación, especialmente del cadmio (Kicińska et al., 2021; Pikula y Stępień, 2021; Wang et al., 2024).

E. Toxicidad y esencialidad

Los metales pesados en el suelo constituyen una importante preocupación ambiental debido a su persistencia, toxicidad y capacidad de acumularse en las cadenas alimentarias. Entre los contaminantes inorgánicos de mayor incidencia se identifica el cadmio, el plomo, el mercurio, el arsénico, el cromo, el cobre, el níquel y el zinc. Su presencia en el suelo puede perjudicar la salud de las plantas, reducir el rendimiento de los cultivos, degradar la calidad del suelo y representar riesgos significativos para la salud humana (Abdul Rashid et al., 2023; Angon et al., 2024; Wan et al., 2024).

Varios metales pesados son micronutrientes esenciales como Cu, Zn, Mn, Fe, Ni, Co, Mo y Cr ya que participa en fotosíntesis; otros (Cd, Pb, Hg, As, Al, Ag) no tienen función conocida y son tóxicos incluso a bajas concentraciones. Cuando la concentración de un metal esencial supera el rango óptimo, se comporta como tóxico igual que los no esenciales (Andresen y Küpper, 2018; Singh et al., 2020; Riyazuddin et al., 2021; El-Sappah et al., 2024; Seregin y Kozhevnikova, 2025).

F. Transporte de metales pesados en plantas

Las plantas absorben metales pesados principalmente a través de las raíces, utilizando mecanismos de transporte pasivos y activos. La entrada de metales a las plantas es por translocación a través del xilema y el floema y el secuestro en vacuolas o paredes celulares. Los hiperacumuladores a menudo sobreexpresan estos transportadores, lo que permite una translocación eficiente de la raíz al brote y su almacenamiento en los tejidos superficiales (Syta et al., 2020; Yang et al., 2021; Skuza et al., 2022; Bhat et al., 2025; Huang et al., 2025).

La movilidad y el destino de metales pesados como el cadmio (Cd), el plomo (Pb), el zinc (Zn) y el arsénico (As) son motivo de especial preocupación debido a su toxicidad y persistencia. Comprender esta dinámica es esencial para la evaluación de riesgos, la remediación y la gestión sostenible (Yang et al., 2022; Li et al., 2023; Yu et al., 2025).

2.2.6. Aguas ácidas de mina

El drenaje ácido de minas (AMD) es un grave problema ambiental derivado de las actividades mineras, caracterizado por aguas altamente ácidas ricas en metales tóxicos y sulfatos. Su formación y persistencia amenazan la calidad del agua, la vida acuática y la salud humana, por lo que su gestión y remediación eficaces son una prioridad mundial. Se forma cuando los minerales de sulfuro (especialmente pirita) en rocas expuestas reaccionan con agua y oxígeno, produciendo ácido sulfúrico y movilizándolo metales como Fe, Al, Cu, Zn y Pb (Rambabu et al., 2020; Wu et al., 2020; Gomes y Valente, 2024; Nie et al., 2025). Este proceso se acelera por la actividad microbiana y es común tanto en minas activas o abandonadas. El DAM provoca un pH extremadamente bajo (a veces inferior a 2), altas concentraciones de metales y graves riesgos ecológicos, como toxicidad para los organismos acuáticos y contaminación del agua potable (Alvarenga et al., 2021; Gomes y Valente, 2024; Nie et al., 2025).

A. Formación de aguas ácidas

De acuerdo con el estudio de Baquero et al. (2008), el mecanismo de generación de aguas ácidas ocurre tanto en niveles profundos como superficiales mediante la oxidación de la pirita (FeS_2) u otros sulfuros expuestos a la humedad y al oxígeno atmosférico, lo que

permite la contaminación de acuíferos y cuerpos de agua superficial. Los autores precisan además que la cinética de este proceso depende de múltiples factores, entre los que destacan el pH, la temperatura, el tipo de mineral y la concentración de oxígeno. Asimismo, la investigación resalta que la reacción requiere una energía de activación específica, la cual es facilitada por la actividad química del hierro férrico y la presencia de agentes biológicos como la bacteria *Thiobacillus ferrooxidans*, que actúa como un catalizador fundamental en el sistema

Esta dinámica oxidativa, complementada por la perspectiva de Aduvire (2006), no solo altera drásticamente el pH y la química de los drenajes, sino que también da lugar a la formación de eflorescencias de variadas tonalidades, como amarillo, verde o marrón. Dichas coloraciones son el resultado físico de la presencia de sulfatos minerales hidratados, los cuales evidencian la severidad de la alteración mineralógica en la zona afectada.

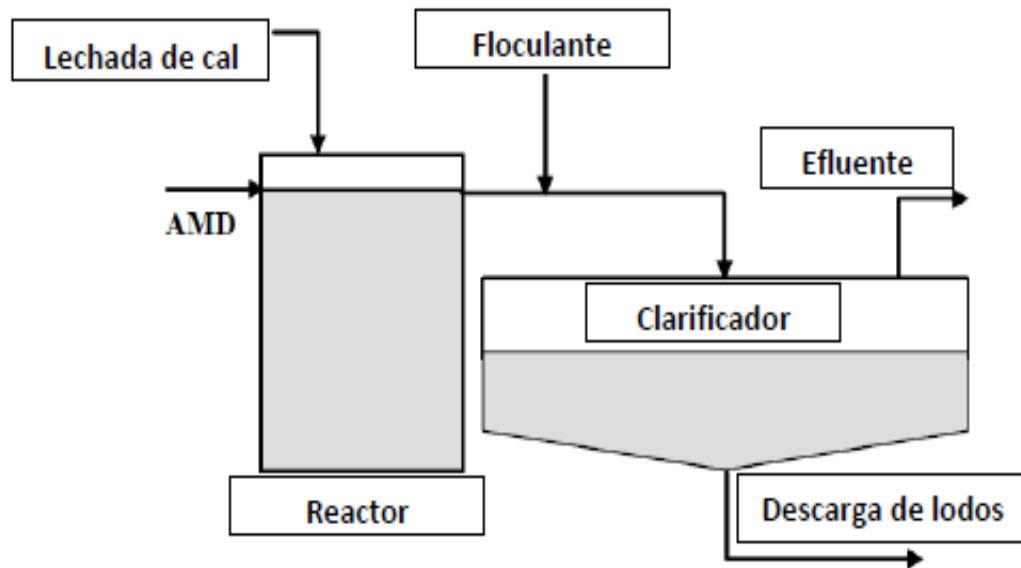
B. Tratamiento de aguas ácidas

Torrico Garcés (2022) sostiene que el tratamiento de aguas ácidas mediante el proceso de lodos de alta densidad (HDS, por sus siglas en inglés) constituye actualmente el estándar industrial para el tratamiento de drenajes ácidos de mina. A diferencia de los métodos convencionales, este proceso evita el contacto directo entre la cal y el efluente ácido; en su lugar, se fundamenta en la recirculación de los lodos hacia una mezcla con lechada de cal para lograr la neutralización. El autor explica que esta operación se realiza bombeando el sedimento desde la base del clarificador hacia una cámara de contacto específica. Asimismo, destaca que dicho mecanismo optimiza la interacción entre los sólidos, lo que favorece la

coagulación de las partículas de cal sobre los precipitados ya reciclados, mejorando así la eficiencia del sistema.

Figura 1.

Esquema de una planta de tratamiento convencional para aguas ácidas



Fuente: Mezei y Cañizares (2012)

2.3. Definición de términos básicos

2.3.1. Fitorremediación de suelos

La fitorremediación es una biotecnología sustentable y rentable que utiliza plantas y microorganismos asociados para eliminar, estabilizar o degradar contaminantes del suelo, el agua y el aire. Este enfoque se reconoce cada vez más como una alternativa sostenible a los métodos de remediación convencionales, especialmente para metales pesados, contaminantes orgánicos y contaminantes emergentes (Ashraf et al., 2019; Raza et al., 2020; Yan et al., 2020; Kafle et al., 2022; Raklami et al., 2022; Aryal, 2024).

2.3.2. Lodos de alta densidad (HDS)

Los lodos de alta densidad (HDS) son un subproducto de los procesos de tratamiento activo para el drenaje ácido de minas (AMD), ampliamente utilizados en minería para neutralizar la acidez y eliminar metales del agua contaminada (Sukati et al., 2018; Kuyucak, 2021; Gastañadui-Cruz et al., 2024).

2.3.3. Aguas ácidas de mina (AMD)

El DAM tiene un pH extremadamente bajo (a veces inferior a 2), altas concentraciones de metales y graves riesgos ecológicos, como toxicidad para los organismos acuáticos y contaminación del agua potable (Alvarenga et al., 2021; Gomes y Valente, 2024; Nie et al., 2025).

2.3.4. Metales pesados en el suelo

Los metales pesados se definen típicamente como elementos con una densidad superior a 5 g/cm³, incluyendo plomo (Pb), mercurio (Hg), cadmio (Cd), arsénico (As), cromo (Cr) y otros. Se originan tanto en fuentes naturales (p. ej., meteorización de rocas, erupciones volcánicas) como en actividades humanas como la minería, los procesos industriales, la agricultura (fertilizantes, pesticidas) y la eliminación inadecuada de residuos. Estos metales contaminan el aire, el agua, el suelo y las cadenas alimentarias, lo que provoca una exposición generalizada (Briffa et al., 2020; Abd Elnabi et al., 2023; Angon et al., 2024).

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Ubicación del experimento

La presente investigación se desarrolló en las instalaciones del Servicio Silvoagropecuario (SESA) de la Universidad Nacional de Cajamarca. Dicha unidad se ubica geográficamente en la ciudad de Cajamarca, a una elevación de 2673 m s. n. m., bajo las coordenadas geográficas 776823 Este y 9206995 Norte.

3.2. Materiales y equipos

- Sustrato (lodos y turba)
- Esquejes de *P. racemosa*
- Contenedor plástico
- Pala manual
- Bandeja
- Flexómetro
- Manguera PVC y aspersor
- Tijera de podar
- GPS (Sistema de Posicionamiento Global).
- Cámara fotográfica digital.
- Balanza digital
- Impresora multifuncional
- Laptop portátil

3.3. Metodología

El tipo de investigación es de carácter aplicado, experimental, utilizando el método científico; se planteó un diseño completamente al azar (DCA) con cinco tratamientos incluido el testigo (Tabla 1) y tres repeticiones para cada tratamiento. La toma de datos se realizó utilizando la observación directa de variables, medición de parámetros de plántones, conteo de individuos, muestras de sustrato y muestras foliares. El periodo de evaluación fue de 150 días.

Tabla 1.*Tratamientos estudiados*

Tratamiento	Descripción
T1	25 % lodo + 75 % turba
T2	50 % lodo + 50 % turba
T3	100 % lodo
T4	75 % lodo + 25 % turba
T5	100 % turba (testigo)

3.3.1. Fase de campo**A. Recolección de material vegetal**

El material vegetal fue colectado de plantaciones de *P. racemosa* ubicadas en el centro poblado de Porcón Alto, provincia y departamento de Cajamarca (Figura

2). Se seleccionaron árboles madre de *P. racemosa* (Figura 3) vigorosos, libre de plagas y enfermedades de los cuales se extrajeron esquejes semileñosos de 10 a 20 cm de longitud y con dos o tres yemas latentes y presencia de nódulos basales. Se tomó una muestra al azar de esquejes de *P. racemosa*, se etiquetó y envió al LABSAF (Laboratorio de Suelos, Aguas y Foliare) del INIA – Cajamarca (Instituto Nacional de Innovación Agraria) para el análisis de metales pesados.

Figura 2.

Ubicación del área de plantaciones de P. racemosa – Porcón Alto

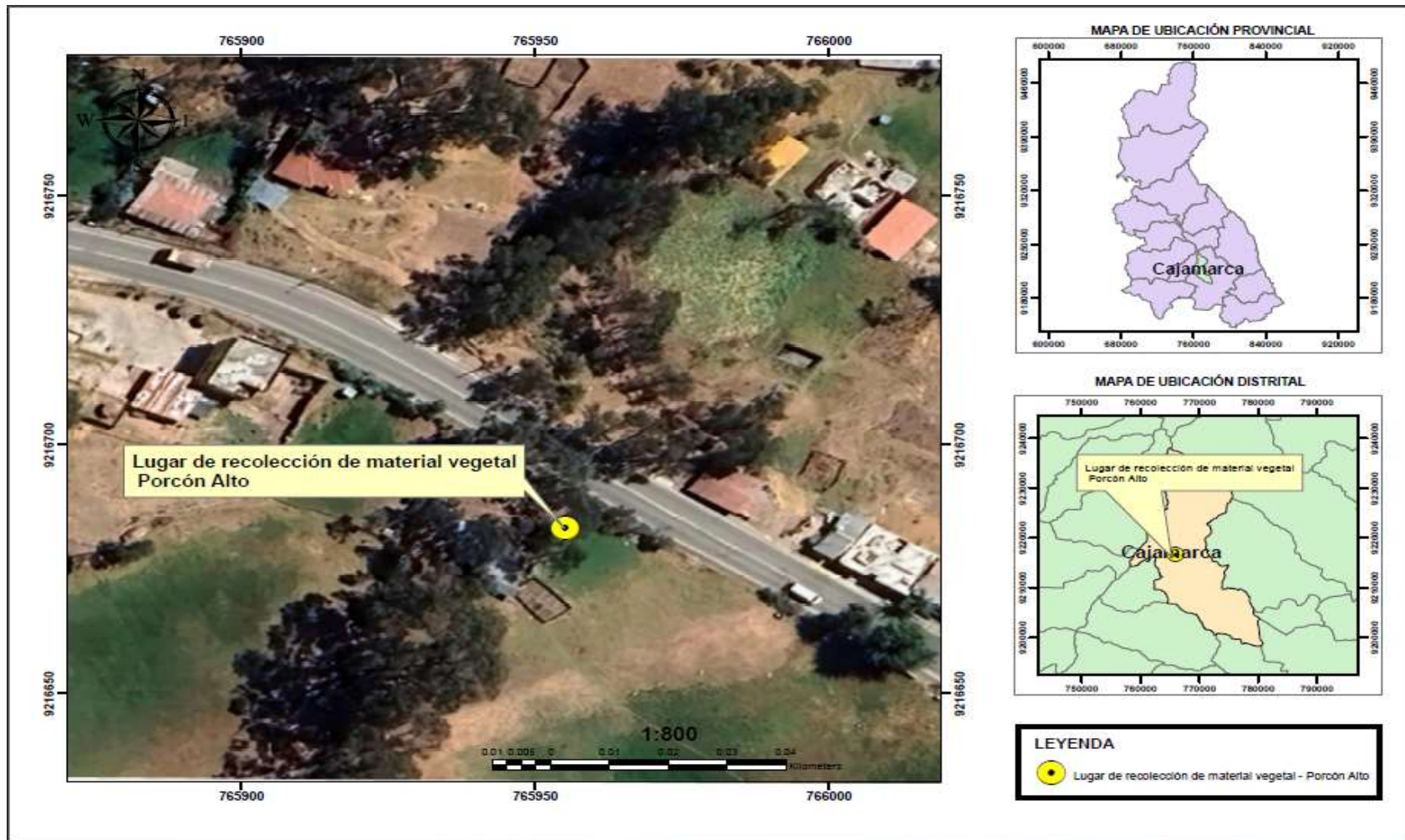


Figura 3.

Árboles madre y recolección de esquejes de P. racemosa del C.P. de Porcón Alto



B. Recolección del lodo y turba

El sustrato estuvo compuesto por lodo (130 kg) y turba (120 kg) (Figura 4), el lodo (deshidratado) se obtuvo de la planta de tratamiento de aguas ácidas de Minera La Zanja, provincia de Santa Cruz (Figura 5), la turba se obtuvo del vivero forestal de la Agencia Agraria de Cajamarca, ubicado en el Centro Poblado de Tartar (Figura 6).

Figura 4.

Composición del sustrato turba y lodo



Figura 5.

Ubicación de la planta de tratamiento de aguas ácidas – Minera La Zanja

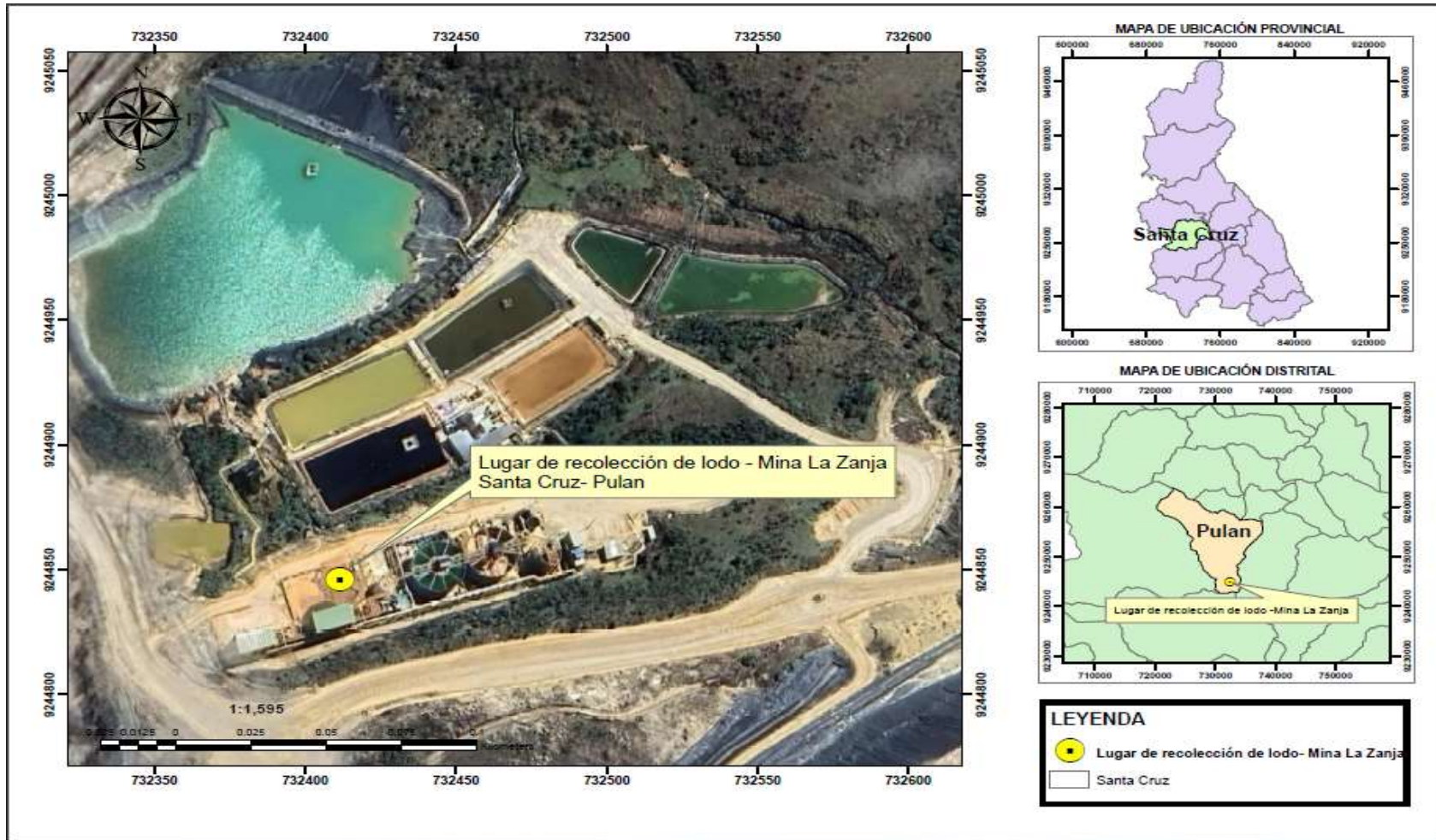
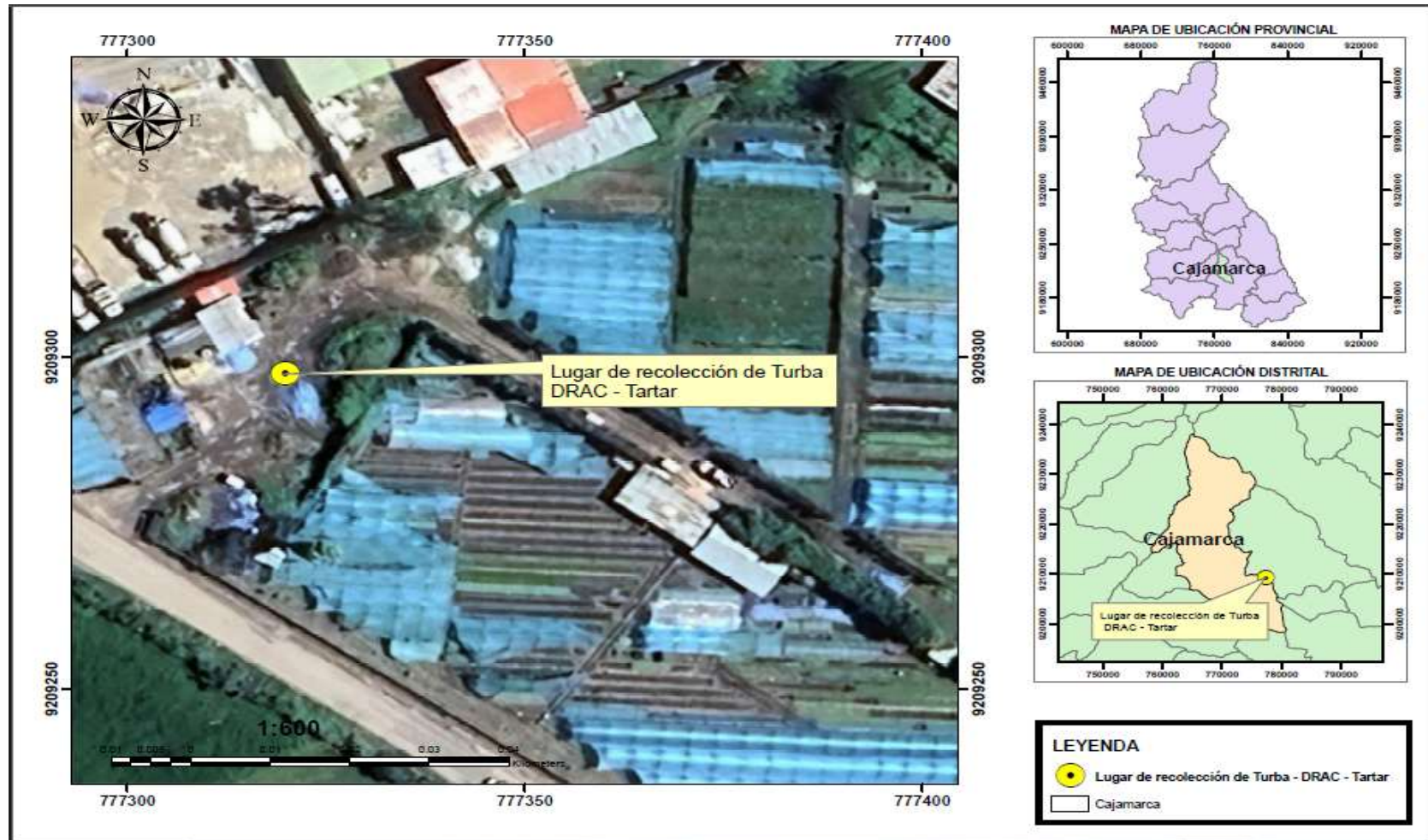


Figura 6.

Ubicación del vivero de la Agencia Agraria de Cajamarca – Centro Poblado de Tartar



C. Establecimiento y conducción del experimento

El acondicionamiento, habilitación y colocación de sustrato se realizó según los tratamientos planteados en la Tabla 1, bajo un DCA identificando los tratamientos por color de contenedor además de la respectiva codificación para ello se utilizó macetas de plástico de colores como contenedor de sustrato donde se sembró los esquejes (Figura 7), después de la siembra se aplicó un riego ligero para mantener la humedad adecuada del sustrato y evitar la deshidratación de los esquejes. Posteriormente se realizó riegos continuos y semanas después con intervalos de dos a tres días o cuando era necesario siempre monitoreando la humedad del sustrato teniendo en cuenta las condiciones climáticas, también se realizó labores culturales como deshierbos, remoción superficial del sustrato para evitar compactación, entre otras hasta culminar el tiempo programado del experimento.

Figura 7.

Siembra de esquejes de P. racemosa en los diferentes tratamientos



D. Recopilación de datos

Para determinar el potencial de acumulación y extracción de metales pesados, se realizó el análisis del sustrato y análisis de la biomasa (tallo y raíz) de los plantones de *P. racemosa* en el LABSAF del INIA- Cajamarca.

3.3.2. Fase de gabinete

Se realizó la sistematización de datos para realizar el análisis estadístico de los tratamientos en estudio con el fin de evaluar el uso potencial de *P. racemosa* en la fitorremediación de lodos resultantes del tratamiento de aguas ácidas de la actividad minera.

A. Evaluación de la eficacia de la fitorremediación de *P. racemosa*

- **Factor de Bioconcentración (FBC)**

El FBC se calculó utilizando la siguiente ecuación (Zheng et al., 2020):

$$\text{FBC} = \frac{[\text{Metal-aéreo o raíz}]}{[\text{Metal-suelo}]} \text{-----} \text{(Ec. 1)}$$

- **Factor de translocación (FT)**

El FT se calculó utilizando la siguiente ecuación (Radovanovic et al., 2020):

$$\text{FT} = \frac{[\text{C Aéreo}]}{[\text{C Raíz}]} \text{-----} \text{(Ec. 2)}$$

B. Análisis estadístico de datos

El análisis y el procesamiento de datos se trabajó bajo un diseño estadístico completamente al azar - DCA, con cinco tratamientos y tres repeticiones, se realizó el análisis de varianza (ANOVA), prueba de Tukey, prueba de variación de medias y pruebas de homogeneidad para la eficiencia de absorción y acumulación de metales pesados en plántones de *P. racemosa*.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Concentración de metales pesados en *P. racemosa*, turba y lodo

En la Tabla 2 se presentan los 18 metales pesados encontrados en el análisis inicial de esquejes de *P. racemosa* (antes de sembrarlos en sustratos con metales pesados), turba y lodo. De los metales pesados encontrados, según los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para suelo según D.S N° 011-2017-MINAM, se determinó que la concentración de Cd (15.52 mg/kg), Cu (2 493.78 mg/kg) y Zn (1 494.53 mg/kg) en el lodo exceden los ECA-suelo, con diferencias de 1 009 % en Cd, 3 400 % en Cu y 400 % en Zn (Figura 8). Mientras que los metales pesados en *P. racemosa* y turba muestran valores por debajo de los límites establecidos en los ECA-suelo.

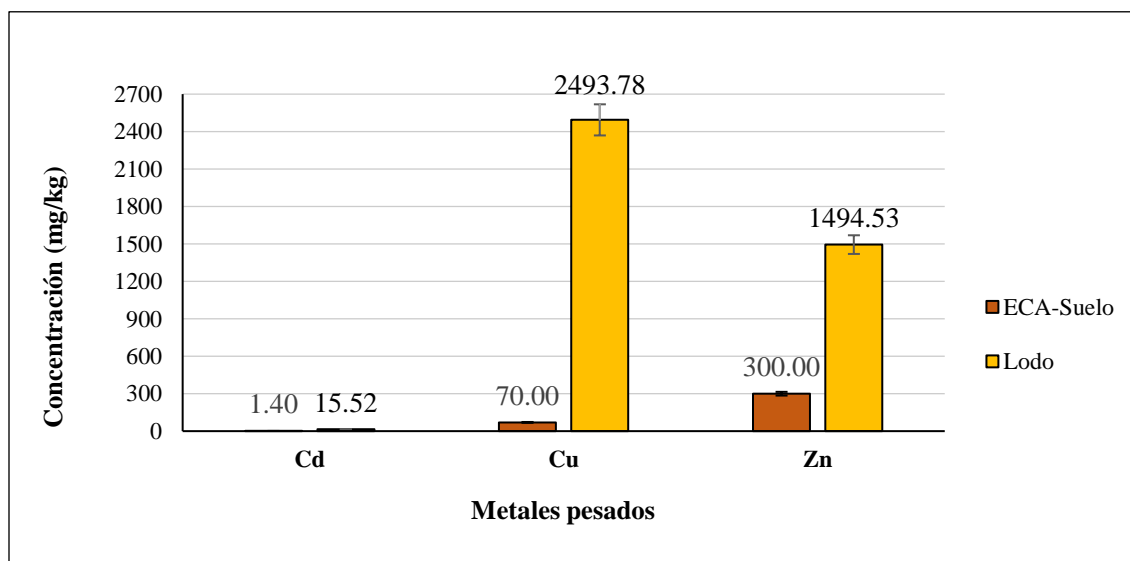
Tabla 2.

Concentración inicial de metales pesados en P. racemosa, turba y lodo

Elemento detectado	<i>P. racemosa</i> (mg/kg)	Turba (mg/kg)	Lodo (mg/kg)	ECA-suelo (mg/kg)
Al	1 393.02	6 595.37	35 361.82	-
As	1.01	5	11.24	50
Ba	70.75	91.94	8.32	750
Ca	16 999.65	79 894.25	59 848.92	-
Cd	1.01	1	15.52	1.4
Co	2.01	<0.05	26.57	-
Cr	3.02	12.99	10.21	70
Cu	14.05	13.49	2 493.78	70
Fe	1 514.97	185 773.39	73 933.78	-
K	11 369.80	1 484.48	468.18	-
Mg	3 630.46	1 649.85	5 075.48	-
Mn	102.87	264.33	2 639.43	-
Mo	1.01	<0.05	<0.05	-
Na	225.81	200.36	356.33	-
Ni	<0.05	14.99	14.55	30
Pb	7.00	<0.05	<0.05	140
Sr	122.43	117.92	109.45	-
Zn	44.20	35.98	1 494.53	300

Figura 8.

Concentración inicial de Cd, Cu y Zn en lodos Vs ECA-suelo



Así mismo, se determinaron propiedades químicas del lodo y turba, los datos muestran un pH ácido para la turba y alcalino para el lodo, bajo contenido de materia orgánica y alta conductividad eléctrica en el lodo (Tabla 3)

Tabla 3.

Parámetros fisicoquímicos en turba y lodo

Parámetro	Turba	Lodo
pH	5.40	8.10
Materia orgánica (%)	15.40	1.10
Conductividad eléctrica mS/m	17.40	288.00

Los lodos generados por la actividad minera es una fuente altamente contaminante para el suelo y los ecosistemas naturales en Cajamarca, principalmente el Cd, Cu y Zn, elementos que superan los ECAs-suelo; esto debido a que el Cd es altamente tóxico incluso en bajas concentraciones inhibe la actividad microbiana del suelo, reduciendo la biomasa microbiana e interrumpe los procesos enzimáticos (fosfatasa alcalina, ureasa, proteasas). Esto conlleva a una alteración del ciclo de nutrientes (sobre todo del N y el S), a una menor descomposición de la materia orgánica y a una menor fertilidad del suelo (Wyszkowska et al., 2012; Alengebawy et al., 2021; Angon et al., 2024). Mientras que el Cu y el Zn son micronutrientes esenciales en bajas concentraciones, pero se vuelven tóxicos cuando aumentan. El exceso de Cu y Zn reduce la biomasa microbiana, altera la estructura de la comunidad microbiana y puede causar deficiencias de macronutrientes (como el P) en el suelo. Ambos metales perturban la actividad enzimática del suelo y pueden desestabilizar su estructura, afectando la porosidad y la retención de agua (Wyszkowska et al., 2012; Angon et al., 2024).

El Cd, Cu y Zn pueden alterar las propiedades físicas del suelo, incluyendo su estructura, textura y estabilidad de agregados, reduciendo aún más la productividad del suelo (Angon et al., 2024). En los suelos agrícolas, la alta concentración de metales pesados, puede interferir negativamente en las plantas como afectar la fertilidad, inhibir el crecimiento, modificar la morfología y fisiología de las plantas, amenazando la seguridad alimentaria. El Cd es particularmente dañino, ya que las plantas lo absorben fácilmente, se acumula en los tejidos comestibles de las plantas y supone importantes riesgos en la alimentación humana ya que al consumirlos puede causar daños renales, hepáticos, óseos y cáncer (Wyszkowska et al., 2012; Saleem et al., 2020; Alengebawy et al., 2021; Angon et al., 2024). Sin embargo, la toxicidad de los metales está influenciada por el pH del suelo, la materia orgánica y las interacciones entre ellos; así mismo el Cu y el Zn pueden antagonizar la absorción de Cd, reduciendo su biodisponibilidad y toxicidad en algunos casos (Rizwan et al., 2017; Adamczyk-Szabela et al., 2020; Usman et al., 2022; Patra et al., 2025).

4.2. Supervivencia de plántones de *P. racemosa*

Los plántones de *P. racemosa* propagados a partir de esquejes, tuvo un 100 % de supervivencia en el T3, T4 y T5 mientras que de 66 % para el T1 y T2 (Figura 9 y 10); sin embargo, según el análisis de varianza (ANOVA) el valor-P de 0.5801 (Tabla 4) indica que ningún tratamiento tiene efecto estadísticamente significativo en la supervivencia de plántones de *P. racemosa*, por lo que afirmamos que los metales pesados presentes en el sustrato no afectaron la supervivencia de los plántones.

Figura 9.

*Evaluación de supervivencia de los plántones de *P. racemosa**

**Figura 10.**

*Porcentaje de supervivencia de los plántones de *P. racemosa**

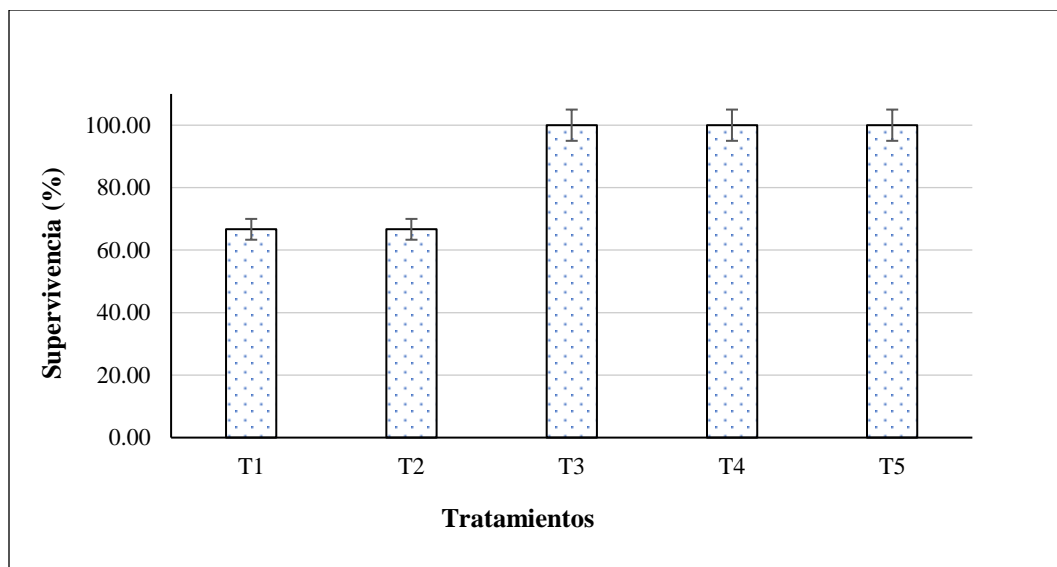


Tabla 4.

Análisis de varianza (ANOVA) para la supervivencia de plantones P. racemosa

Fuente de Variación	G.L.	S.C.	C.M.	Razón-F	Valor-P
Tratamiento	4	0.40	0.10	0.75	0.5801
Error experimental	10	1.33	0.13		
TOTAL	14	1.73			

Nota: Valor-P mayor a 0.05, no indica efecto estadísticamente significativo entre tratamientos para la supervivencia de *P. racemosa* con un 95.0% de nivel de confianza.

La supervivencia de las plantas depende de una compleja interacción de características fisiológicas, condiciones ambientales y estrategias adaptativas. Entre los factores clave que influyen en la supervivencia se encuentran los mecanismos de resistencia a la sequía, como el enraizamiento profundo, la caducidad en condiciones de sequía y la tolerancia al bajo potencial hídrico; asimismo, la supervivencia de las plantas suele disminuir cuando se trasplantan a condiciones no nativas o más estresantes (Midolo y Wellstein, 2020; Champagne-Caron et al., 2024; Ramachandran et al., 2024).

La supervivencia de *P. racemosa* se ve influenciada por factores tanto ecológicos como humanos. En viveros, se logra un crecimiento óptimo con fertilización balanceada (200-100-200 mg/l de NPK), lo que resulta en mayor altura y producción de hojas (Haro et al., 2018). La supervivencia de *P. racemosa* en suelos contaminados con metales pesados se ve amenazada por los efectos tóxicos que estos metales tienen sobre la salud de las plantas, las comunidades microbianas del suelo y el ciclo de nutrientes. Los metales pesados pueden perjudicar el crecimiento de las plantas, reducir la diversidad microbiana y alterar las

funciones esenciales del suelo, lo que dificulta el desarrollo de especies sensibles en dichos entornos (Abdu et al., 2016; Stefanowicz et al., 2020; Yin et al., 2022).

La presencia de materia orgánica en el suelo también desempeña un papel crucial en la mitigación de los efectos negativos de los metales pesados tanto en las plantas como en los microbios del suelo, a menudo, amortiguando la toxicidad y favoreciendo comunidades microbianas y vegetales más saludables (Stefanowicz et al., 2020; Yin et al., 2022). En general, la supervivencia de las plantas está determinada por una combinación dinámica de rasgos intrínsecos, estrategias adaptativas y presiones ambientales externas (Pivovarov et al., 2016; Midolo y Wellstein, 2020; Zandalinas et al., 2020; Ramachandran et al., 2024).

Las plantas nativas adaptadas a las condiciones locales suelen tener un mejor desempeño que las especies exóticas en supervivencia como en potencial de remediación en metales pesados específicos (Azizi et al., 2023; Hassan et al., 2024; Huslina et al., 2024; Wang et al., 2024; Córdoba-Tovar et al., 2025).

En cuanto al crecimiento, *P. racemosa* mostró un normal desarrollo de raíz como de tallo (Figura 11). El mayor crecimiento se obtuvo en el T5 (Figura 12); sin embargo, según el análisis de varianza (ANOVA) el valor-P de 0.7397 (Tabla 5) indica que ningún tratamiento tiene efecto estadísticamente significativo, es decir los metales pesados presentes en el sustrato no afectaron el crecimiento de los plantones de *P. racemosa*.

Figura 11.

Evaluación de crecimiento de los plantones de P. racemosa

**Figura 12.**

Crecimiento de plantones de P. racemosa en función de los 5 tratamientos

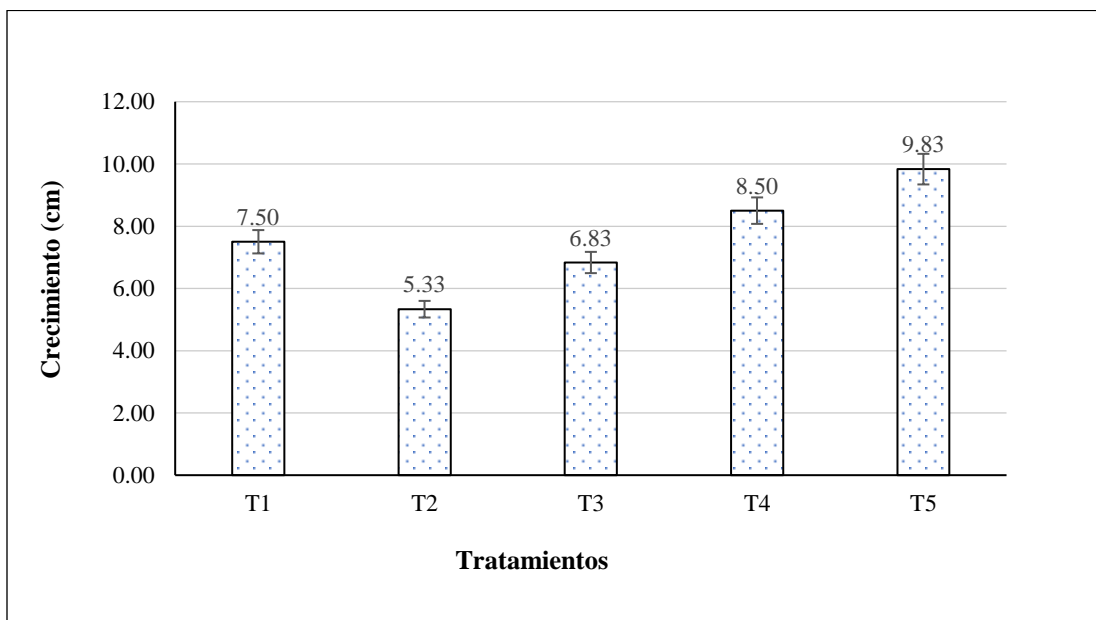


Tabla 5.

Análisis de varianza (ANOVA) para el crecimiento de plantones de P. racemosa

Fuente de Variación	G.L.	S.C.	C.M.	Razón-F	Valor-P
Tratamiento	4	34.60	8.65	0.50	0.7397
Error experimental	10	174.50	17.45		
TOTAL	14	209.10			

Nota: Valor-P mayor a 0.05, no indica efecto estadísticamente significativo entre tratamientos para el crecimiento longitudinal (cm) de *P. racemosa* con un 95.0% de nivel de confianza.

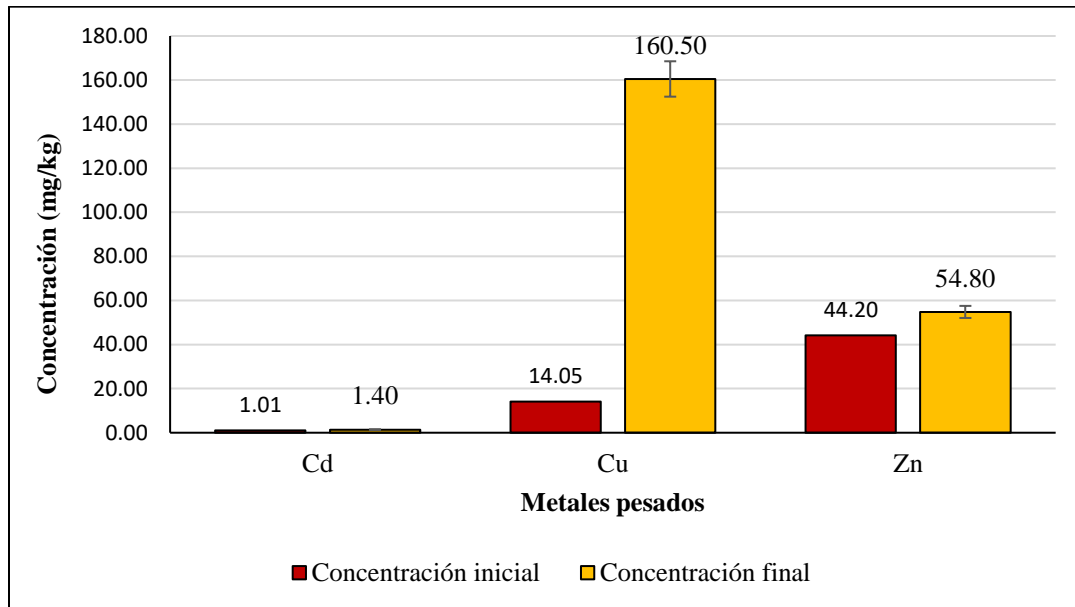
Los resultados de supervivencia y crecimiento de los plantones de *P. racemosa* muestran que es una especie tolerante a Cd, Cu y Zn; esto debido a que los metales pesados pueden perjudicar el crecimiento de las plantas, reducir la diversidad microbiana y alterar las funciones esenciales del suelo, lo que dificulta el desarrollo de especies sensibles a suelos contaminados con metales pesados (Abdu et al., 2016; Stefanowicz et al., 2020; Yin et al., 2022).

4.3. Acumulación y extracción de Cd, Cu y Zn en la biomasa aérea y radicular de *P. racemosa*

Los plantones de *P. racemosa* después de ser cultivados en sustratos con presencia de metales pesados mostraron un incremento con respecto a la concentración inicial en la biomasa aérea y radicular que, en promedio para el Cd pasó de 1.01 a 1.40 mg/kg representando un incremento de 38.6 %; en el Cu pasó de 14.05 a 160.50 mg/kg incrementando 1 042 % y para el Zn pasó de 44.20 a 54.80 mg/kg representando un incremento de 23.98 % (Figura 13).

Figura 13.

Acumulación inicial y final de Cd, Cu y Zn en P. racemosa



La Tabla 6 muestra la variación de la acumulación del Cd, Cu y Zn en la biomasa aérea y radicular en plántulas de *P. racemosa* según los tratamientos, así como también la extracción expresada a través del Factor de Bioconcentración (FBC) y Factor de Translocación (FT).

Tabla 6.*Extracción y acumulación de Cd, Cu y Zn en plantones de P. racemosa*

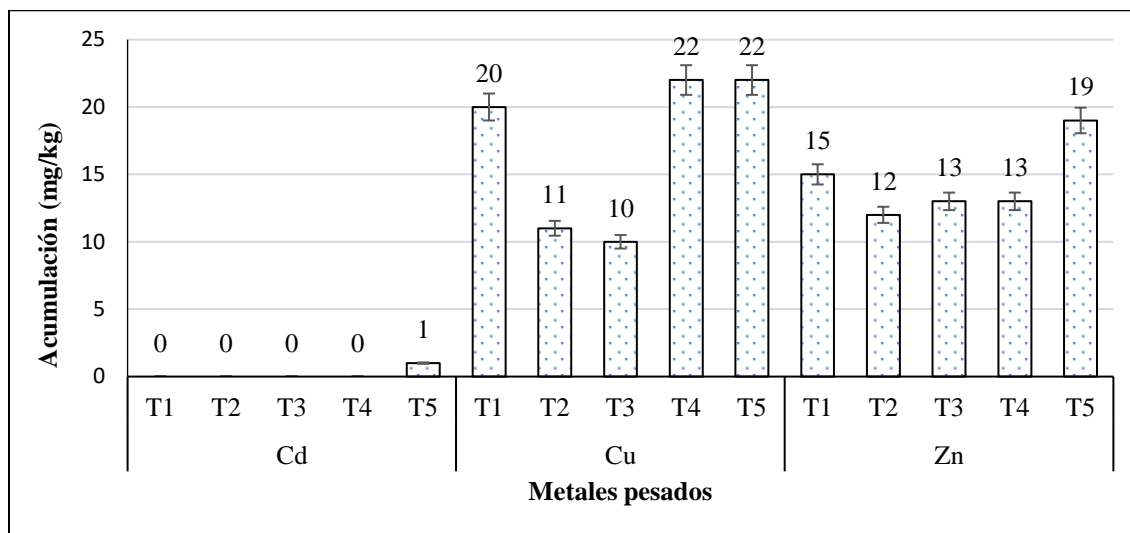
Metales pesados	Tratamiento	Acumulación Biomasa aérea mg/kg	Acumulación Biomasa radicular mg/kg	Concentración Sustrato mg/kg	FBC Biomasa aérea	FBC Biomasa radicular	FT
Cd	T1	0.00	1.00	3.00	0.00	0.33	0.00
	T2	0.00	1.00	6.63	0.00	0.15	0.00
	T3	0.00	2.00	13.89	0.00	0.14	0.00
	T4	0.00	1.00	10.26	0.00	0.10	0.00
	T5	1.00	1.00	0.00	-	-	1.00
Cu	T1	20.00	71.00	557.44	0.04	0.13	0.28
	T2	11.00	111.00	1 016.71	0.01	0.11	0.10
	T3	10.00	318.00	1 859.28	0.01	0.17	0.03
	T4	22.00	199.00	1 454.33	0.02	0.14	0.11
	T5	22.00	18.50	3.99	5.51	4.64	1.19
Zn	T1	15.00	42.00	197.80	0.08	0.21	0.36
	T2	12.00	23.00	321.33	0.04	0.07	0.52
	T3	13.00	84.00	390.22	0.03	0.22	0.15
	T4	13.00	45.00	384.50	0.03	0.12	0.29
	T5	19.00	8.00	29.94	0.63	0.27	2.38

4.3.1. Acumulación de metales pesados en la biomasa aérea de P. racemosa

El tratamiento que generó mayor acumulación para Cd y Zn en la biomasa aérea en *P. racemosa* fue el T5 (100 % turba) de 1 y 22 mg/kg respectivamente, mientras que para el Cu el T4 (75 % lodo + 25 % de turba) y el T5, ambos con 22 mg/kg (Tabla 6 y Figura 14).

Figura 14.

Acumulación de Cd, Cu y Zn (mg/kg) en la biomasa aérea de P. racemosa



El análisis de varianza muestra un valor- $P < 0.05$ (Tabla 7) para Cd, Cu y Zn lo que indica diferencias estadísticas altamente significativas entre tratamientos para la acumulación en la biomasa aérea de *P. racemosa*.

Tabla 7.

Análisis de varianza (ANOVA) para la acumulación de Cd, Cu y Zn en la biomasa aérea de *P. racemosa*

Fuente de Variación	Valor-P
Cd	9.97×10^{-3}
Cu	2.44×10^{-5}
Zn	1.75×10^{-6}

Nota: Valor-P menor a 0.05, indica efecto estadísticamente significativo entre tratamientos con un 95.0% de nivel de confianza.

La prueba de rango múltiple LSD (*Diferencias Mínimas Significativas*) muestra que la mayor acumulación en la biomasa aérea de *P. racemosa* se obtiene para Cd en el T5 (100 % turba), para Cu en T1, T4 y T5 respectivamente, mientras que para Zn en el T5 (Tabla 8).

Tabla 8.

Prueba de rango múltiple LSD para la acumulación de Cd, Cu y Zn en la biomasa aérea de P. racemosa

Biomasa	Tratamientos	Cd	Cu	Zn
Aérea	T1	0.00 a	20.00 b	15.00 b
	T2	0.00 a	11.00 a	12.00 a
	T3	0.00 a	10.00 a	13.00 a
	T4	0.00 a	22.00 b	13.00 a
	T5	1.00 b	22.00 b	19.00 c

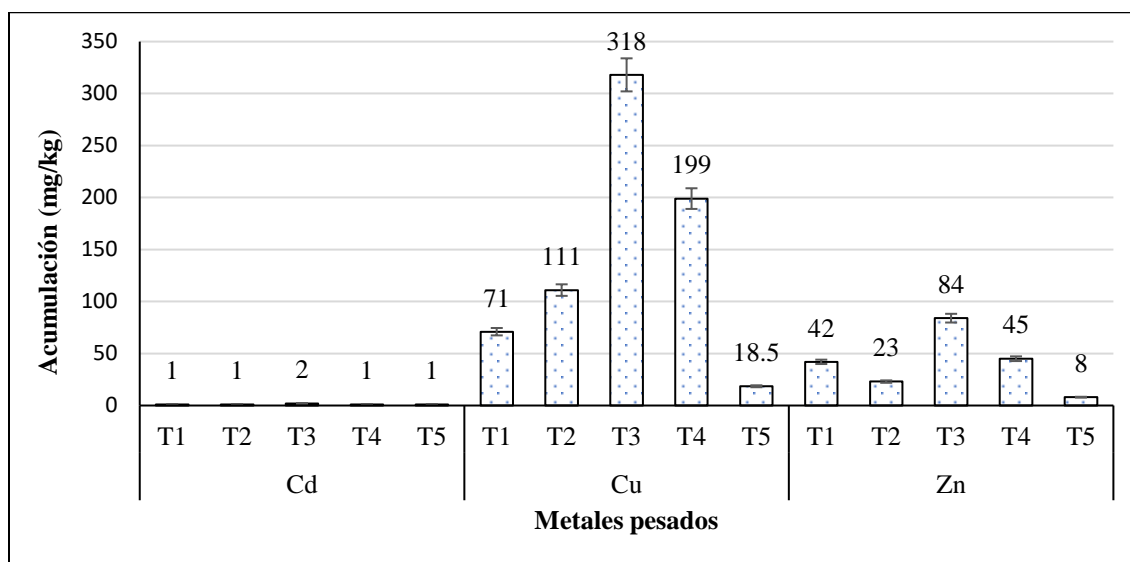
Nota: Valor-P menor a 0.05, indica efecto estadísticamente significativo entre tratamientos sobre acumulación de Cd, Cu y Zn en la biomasa aérea de *P. racemosa* con un 95.0 % de nivel de confianza.

4.3.2. Acumulación de metales pesados en la biomasa radicular de *P. racemosa*

De acuerdo con la Figura 15, la mayor acumulación de metales en la biomasa radicular de *P. racemosa* se registró en el tratamiento T3 (100 % lodo), alcanzando concentraciones de 2 mg/kg para Cd, 318 mg/kg para Cu y 84 mg/kg para Zn

Figura 15.

Acumulación de Cd, Cu y Zn (mg/kg) en la biomasa radicular de P. racemosa



El análisis de varianza muestra un valor- $P < 0.05$ (Tabla 9) para los tres metales pesados, lo que indica diferencias estadísticas altamente significativas entre tratamientos para la acumulación de Cd, Cu y Zn en la biomasa radicular de *P. racemosa*.

Tabla 9.

Análisis de varianza (ANOVA) para la acumulación de Cd, Cu y Zn en la biomasa radicular de P. racemosa

Fuente de Variación	Valor-P
Cd	9.97×10^{-3}
Cu	4.81×10^{-18}
Zn	3.66×10^{-10}

Nota: Valor-P menor a 0.05, indica efecto estadísticamente significativo entre tratamientos sobre acumulación de Cd, Cu y Zn en la biomasa radicular de *P. racemosa* con un 95.0 % de nivel de confianza.

La prueba de rango múltiple LSD (*Diferencias Mínimas Significativas*) muestra que la mayor acumulación en la biomasa radicular de *P. racemosa* se obtiene en el T3 para Cd, Cu y Zn (Tabla 10).

Tabla 10.

Prueba de rango múltiple LSD para la acumulación de Cd, Cu y Zn en la biomasa radicular de P. racemosa

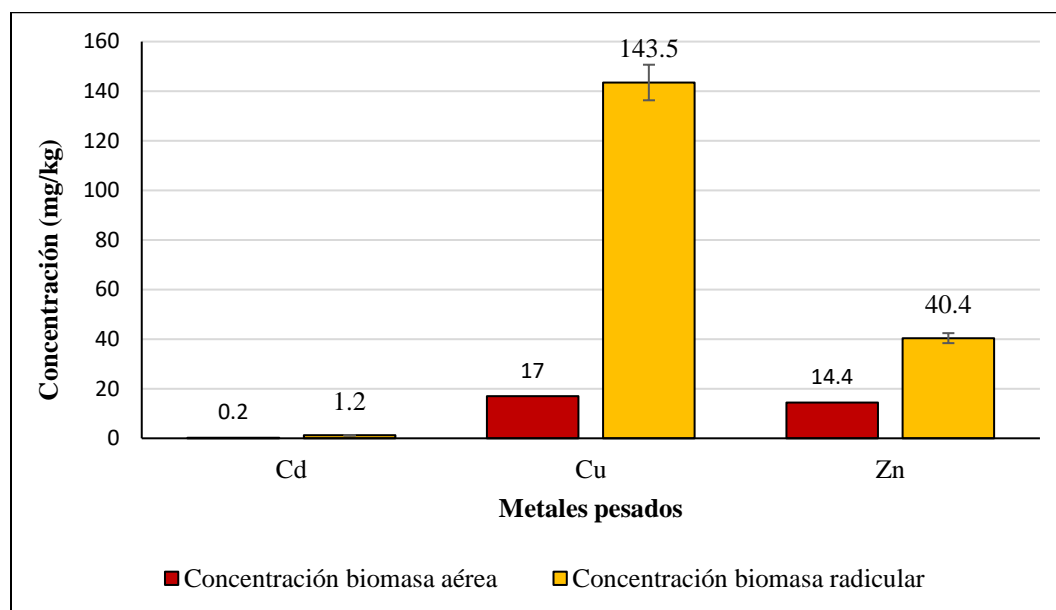
Biomasa	Tratamientos	Cd	Cu	Zn
Radicular	T1	1.00 a	71.00 b	42.00 c
	T2	1.00 a	111.00 c	23.00 b
	T3	2.00 b	318.00 e	84.00 d
	T4	1.00 a	199.00 d	45.00 c
	T5	1.00 a	18.50 a	8.00 a

Nota: Letras distintas entre niveles expresa existencia de diferencias estadísticamente significativas, letras comunes indica una respuesta homogénea entre los tratamientos evaluados con un nivel de confianza del 95.0 %.

La acumulación de Cd, Cu y Zn (Figura 16) en *P. racemosa*, es mayor en la biomasa radicular en comparación con la aérea. Esto indica que es una especie acumuladora, ya que la eficiencia de la acumulación depende de la genética de la planta, las propiedades del suelo (pH, materia orgánica), el tipo de metal y las condiciones ambientales (Bhat et al., 2022; Yaashikaa et al., 2022; Ghuge et al., 2023; Bhat et al., 2025).

Figura 16.

Acumulación de metales en la biomasa aérea y radicular de P. racemosa



La acumulación de metales está influenciada por las concentraciones de metales en el suelo y el agua, el pH, el genotipo de la planta y la presencia de microorganismos de la rizosfera, que pueden aumentar la absorción y la tolerancia (Zhao et al., 2020; Li et al., 2023; Shi et al., 2024). Gran parte de las plantas fitorremediadoras almacenan metales pesados en la biomasa radicular, lo que limita su translocación a los brotes. Si bien esto es beneficioso para la fitoestabilización, puede limitar la eficiencia de la fitoextracción de metales pesados (Xu et al., 2019; Sorour et al., 2024).

4.3.3. Factor de Bioconcentración (FBC) en P. racemosa

En la Tabla 11 el Cu en el T5 (100 % turba) muestra un FBC > 1 tanto para la biomasa aérea y radicular, esto indica que es una especie acumuladora para este metal, mientras que

para Cd (radicular) y Zn (radicular y aéreo) del T1 al T4 presentan un FBC < 1 lo que indica una baja absorción o mecanismos de exclusión de estos metales por *P. racemosa*.

Tabla 11.

Factor de bioconcentración (FBC) de metales pesados en P. racemosa

Biomasa	Tratamientos	Cd	Cu	Zn
Aérea	T1	0.00	0.04	0.08
	T2	0.00	0.01	0.04
	T3	0.00	0.01	0.03
	T4	0.00	0.02	0.03
	T5	-	5.51	0.63
Radicular	T1	0.33	0.13	0.21
	T2	0.15	0.11	0.07
	T3	0.14	0.17	0.22
	T4	0.10	0.14	0.12
	T5	-	4.64	0.27

De la Cruz (2021) documenta que *Polylepis sp.* tiene gran potencial en la absorción de Pb y Zn en su sistema radicular, así mismo Grabiell y Taibe (2024) afirman que *P. racemosa* es una especie acumuladora de Cu, Pb, As y Cd. La acumulación de metales está influenciada por las concentraciones de metales en el suelo y el agua, el pH, el genotipo de la planta y la presencia de microorganismos de la rizosfera, que pueden aumentar la absorción y la tolerancia (Zhao et al., 2020; Li et al., 2023; Shi et al., 2024).

4.3.4. Factor de Translocación (FT) en *P. racemosa*

En la Tabla 12 se puede apreciar un FT ≥ 1 en el T5 para Cd (1.00), Cu (1.19) y Zn (2.38), esto indica un movimiento eficiente de estos metales desde la raíz a las partes aéreas en plantones de *P. racemosa*, mientras que en los demás tratamientos (T1 al T4) muestra una baja translocación (FT ≤ 0.5) es decir los elementos se acumulan mayormente en las raíces,

sin embargo, para el Cd muestra un $FT = 0$ indicando que no se absorben en estos tratamientos.

Tabla 12.

Factor de translocación (FT) de metales pesados en P. racemosa

Especie	Tratamientos	Cd	Cu	Zn
<i>P. racemosa</i>	T1	0.00	0.28	0.36
	T2	0.00	0.10	0.52
	T3	0.00	0.03	0.15
	T4	0.00	0.11	0.29
	T5	1.00	1.19	2.38

Grabiell y Taibe (2024) al estudiar la traslocación *P. racemosa*, *B. coriacea* y *B. latifolia* obtuvieron un $FT < 1$ el cual indica que estas especies son exclusoras para los metales pesados Cu, Pb, Zn, As y Cd; concordando con nuestros resultados para Cd, Cu y Zn lo cual evidencia el comportamiento excluyente de *P. racemosa* en los tratamientos que contenían lodo en diferentes porcentajes (T1 al T4).

Como queda demostrado en estos resultados, la fitorremediación es una alternativa para descontaminar lodos de alta densidad (HDS) con metales pesados, generados en el tratamiento de aguas ácidas de mina. Diferentes plantas, como el pino silvestre y la acacia negra, han demostrado una eficacia variable para mejorar la calidad de los sedimentos, lo que sugiere un potencial para la recuperación ecológica de los yacimientos mineros (Cai et al., 2021). Las plantas nativas adaptadas a las condiciones locales suelen tener un mejor desempeño que las especies exóticas en potencial de remediación; algunas especies, además, presentan altos factores de bioconcentración y translocación para metales específicos (Azizi et al., 2023; Hassan et al., 2024; Huslina et al., 2024; Wang et al., 2024; Córdoba-Tovar et al., 2025).

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES

Se determinó la concentración inicial de 18 metales pesados en el lodo, turba y plantones de *P. racemosa*, de los cuales 15 se encontraron con concentraciones por debajo de los estándares de calidad ambiental. Sin embargo, el lodo evidenció niveles críticos de contaminación al superar el ECA-suelo en Cu (2 493.78 mg/kg), Cd (15.52 mg/kg), y Zn (1 494.53 mg/kg), lo que representa un exceso del 3 400 %, 1 009 % y 400 % respectivamente.

El porcentaje de supervivencia de *P. racemosa* osciló entre 66 % y 100 %, sin diferencias estadísticas significativas entre tratamientos, lo que indica una alta tolerancia de la especie a sustratos con presencia de lodos contaminados.

Se evidenció que *P. racemosa* presentó mayor acumulación de metales pesados en el sistema radicular en el T3, con 318 mg/kg de Cu, 84 mg/kg de Zn y 2 mg/kg de Cd, mientras que en la biomasa aérea fue en el T5 con 22 mg/kg de Zn y 1 mg/kg de Cd, esto indica un comportamiento predominantemente acumulador en las raíces. Los valores de $FBC \geq 1$ para Cu y Zn y $FT \geq 1$ para Cd, Cu y Zn ambos en el tratamiento T5 indican que *P. racemosa* posee capacidad de fitoextracción para Cd, Cu y Zn bajo ciertas condiciones, aunque su tendencia general sugiere un comportamiento combinado de fitoextracción y fitostabilización.

CAPÍTULO VI

REFERENCIAS

- Abd Elnabi, MK, Elkaliny, NE, Elyazied, MM, Azab, SH, Elkhalfa, SA, Elmasry, S., Mouhamed, MS, Shalamesh, EM, Alhorienny, NA, Abd Elaty, AE, Elgendy, IM, Etman, AE, Saad, KE, Tsigkou, K., Ali, SS, Kornaros, M. y Mahmoud, YA-G. (2023). Toxicidad de los metales pesados y avances recientes en su eliminación: una revisión. *Tóxicos*, 11 (7), 580. <https://doi.org/10.3390/toxics11070580>
- Abdu, N., Abdullahi, A., y Abdulkadir, A. (2016). Metales pesados y microbios del suelo. *Environmental Chemistry Letters*, 15, 65-84. <https://doi.org/10.1007/s10311-016-0587-x>.
- Abdul Rashid, SR, Wan Yaacob, WZ, y Umor, MR (2023). Evaluaciones de la acumulación, biodisponibilidad, movilidad y toxicidad de metales pesados en suelos serpentinos. *Sustainability*, 15 (2), 1218. <https://doi.org/10.3390/su15021218>
- Adamczyk-Szabela, D., Lisowska, K., Romanowska-Duda, Z., y Wolf, W. M. (2020). Combined cadmium-zinc interactions alter manganese, lead, copper uptake by *Melissa officinalis*. *Scientific reports*, 10(1), 1675. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-58491-9>
- Adamczyk-Szabela, D., y Wolf, W. (2022). El impacto del pH del suelo en la absorción de metales pesados y la eficiencia de la fotosíntesis en *Melissa officinalis*, *Taraxacum*

officinalis, Ocimum basilicum. *Molecules*, 27.
<https://doi.org/10.3390/molecules27154671>.

Aduvire, O. (2006). *Drenaje Ácido de Mina Generación y Tratamiento*. Instituto Geológico y Minero de España Dirección de Recursos Minerales y Geoambiente. Madrid – España. https://info.igme.es/sidpdf/113000/258/113258_0000001.pdf

Aduvire, O. (2018). *Dimensionado de sistemas de tratamiento de aguas ácidas de mina*. Medio Ambiente Minero y Minería. I, 1-11.
http://www.scielo.org.bo/pdf/mamym/n5/n5_a01.pdf

Alengebawy, A., Abdelkhalek, ST, Qureshi, SR y Wang, M.Q. (2021). Toxicidad de metales pesados y pesticidas en suelos y plantas agrícolas: Riesgos ecológicos e implicaciones para la salud humana. *Toxics*, 9 (3), 42. <https://doi.org/10.3390/toxics9030042>

Ali, S., Abbas, Z., Rizwan, M., Zaheer, IE, Yavaş, İ., Ünay, A., Abdel-DAIM, MM, Bin-Jumah, M., Hasanuzzaman, M. y Kalderis, D. (2020). Aplicación de plantas acuáticas flotantes en la fitorremediación de aguas contaminadas con metales pesados: Una revisión. *Sustainability*, 12 (5), 1927. <https://doi.org/10.3390/su12051927>

Alvarenga, P., Guerreiro, N., Simões, I., Imaginário, MJ y Palma, P. (2021). Evaluación del impacto ambiental del drenaje ácido de minas en aguas superficiales, sedimentos fluviales y macrófitos mediante una batería de indicadores químicos y ecotoxicológicos. *Water*, 13 (10), 1436. <https://doi.org/10.3390/w13101436>

- Amezcuca, A., Hernández, E., y Díaz, P. (2020). *Fitorremediación de residuos de minas contaminados con metales pesados*. Revista Iberoamericana de Ciencias, 1–14. <https://www.reibci.org/publicados/2020/jul/3800112.pdf>
- Anaya-Raymundo, Mario A., Ruíz-Janje, Alejandro, Blas-Montenegro, Luz P., Angulo-Valdivia, Rafael M., & De la Cruz Cámaco, Dante P. (2025). Origen, distribución y dinámica de metales pesados en suelos agrícolas: implicaciones edáficas y ambientales. *Manglar*, 22(2), 287-301. Epub 29 de junio de 2025. <https://doi.org/10.57188/manglar.2025.030>
- Andresen, E., Peiter, E., y Küpper, H. (2018). Metabolismo de metales traza en plantas. *Journal of experimental botany*, 69 5, 909-954. <https://doi.org/10.1093/jxb/erx465>.
- Angon, P., Islam, M., Kc, S., Das, A., Anjum, N., Poudel, A., y Suchi, S. (2024). Fuentes, efectos y perspectivas actuales de la contaminación por metales pesados: suelo, plantas y cadena alimentaria humana. *Heliyon*, 10. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e28357>.
- Antoniadis, V., Shaheen, S., Stärk, H., Wennrich, R., Levizou, E., Merbach, I. y Rinklebe, J. (2020). Potencial de fitorremediación de doce especies de plantas silvestres para elementos tóxicos en un suelo contaminado. *Environment international*, 146, 106233. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106233>
- Arévalo, M.E., Oberpaur, W., y Méndez, C. (2016). Inclusión de musgo (*Sphagnum magellanicum* Brid.) y fibra de coco como componentes orgánicos del sustrato para

- almácigos de kiwi (*Actinidia deliciosa*). *Idesia (arica)*, 34, 47-55.
<https://doi.org/10.4067/s0718-34292016005000007>.
- Aryal, M. (2024). Estrategias de fitorremediación para mitigar tóxicos ambientales. *Heliyon*, 10 (19), 25. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e38683>
- Ashraf, S., Ali, Q., Zahir, Z., Ashraf, S., y Asghar, H. (2019). Fitorremediación: una forma ambientalmente sostenible de recuperar suelos contaminados con metales pesados. *Ecotoxicología y seguridad ambiental*, 174, 714-727.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.02.068>.
- Aziz, RA, Yiwen, M., Saleh, M., Salleh, MN, Gopinath, SCB, Giap, SGE, Chinni, SV y Gopinath, R. (2023). Bioacumulación y translocación de metales pesados en arroz (*Oryza sativa* L.) y suelo en diferentes prácticas de uso de la tierra. *Sustainability*, 15 (18), 13426. <https://doi.org/10.3390/su151813426>
- Azizi, M., Faz, A., Zornoza, R., Martinez-Martinez, S., y Acosta, JA (2023). Potencial de fitorremediación de especies vegetales nativas en suelos mineros contaminados por metaloides y tierras raras. *Plants*, 12 (6), 1219.
<https://doi.org/10.3390/plants12061219>
- Baquero, J., Fernández, R., Verdejo, J., y Lorca, D. (2008). Tratamiento de Aguas Ácidas. Prevención y Reducción de la Contaminación. *Revista de La Sociedad Española de Mineralogía*, 44–47.

- Barbaro, L., Karlanián, M., y Leguizamón, D. (2015). Efecto del uso de hidrogel en un sustrato formulado con turba Sphagnum y otro con turba subtropical para la producción de plantines de *Impatiens walleriana*. *Agriscientia*, 32, 123-129. <https://doi.org/10.31047/1668.298x.v32.n2.16563>.
- Bhat, B., Rather, M., Bilal, T., Mir, R., Qadir, R. y Mir, R. (2025). Hiperacumuladores vegetales: una revisión de vanguardia sobre el mecanismo de transporte y secuestro de metales pesados. *Frontiers in Plant Science*, 16. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1631378>
- Bhat, S., Bashir, O., Haq, S., Amin, T., Rafiq, A., Ali, M., Américo-Pinheiro, J., y Sher, F. (2022). Fitorremediación de metales pesados en suelo y agua: Un enfoque ecológico, sostenible y multidisciplinario. *Chemosphere*, 303(1), 134788. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134788>
- Bhuyan, S., Bhuyan, S., y Sahu, H. (2021). Evaluación del desempeño de materiales de desecho para el tratamiento de drenaje ácido de minas para eliminar metales pesados y sulfatos. *Calidad del agua: factores e impactos [Título provisional]*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.99669>.
- Bogush, A., Voronin, V., Tikhova, V., y Anoshin, G. (2016). Aplicación de un agente turba-húmico para la remediación de drenaje ácido de minas y eliminación de elementos.
- Briffa, J., Sinagra, E. y Blundell, R. (2020). Contaminación ambiental por metales pesados y sus efectos toxicológicos en humanos. *Heliyon*, 6(9). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04691>

- Cai, R., Xue, J., Tan, L., Zhao, Z. y Zhang, Z. (2021). Estudio de las propiedades fisicoquímicas de los sedimentos de lodos de alta densidad en una mina de cobre después de la fitorremediación. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 21, 2884-2892. <https://doi.org/10.1007/s42729-021-00575-0>
- Cano, R., Almonacid, M., Mendoza, E., Antonio, V., y Tinco, M. (2021). Estado hídrico de los bosques de *Polylepis* relacionado con el gradiente altitudinal, las variables microclimáticas y la pendiente. *Journal of Ecological Engineering*, 22, 151-160. <https://doi.org/10.12911/22998993/132425>.
- Caporale, A., y Violante, A. (2016). Procesos químicos que afectan la movilidad de metales pesados y metaloides en ambientes de suelo. *Current Pollution Reports*, 2, 15-27. <https://doi.org/10.1007/s40726-015-0024-y>.
- Champagne-Caron, J., Frédette, C., Poulin, M. y Grégoire, G. (2024). Supervivencia y crecimiento de plantas en células de biorretención en clima frío *Ecological Engineering*, 202, 107239. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2024.107239>
- Córdoba-Tovar, L., Marrugo-Madrid, S., Castro, L., Tapia-Contreras, E., Marrugo-Negrete, J. y Díez, S. (2025). Exploración del potencial de fitorremediación de especies vegetales en suelos impactados por la minería de oro en el norte de Colombia. *Environmental Science and Pollution Research International*, 32, 3795-3808. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-35853-8>.
- Cristaldi, A., Conti, G., Jho, E., Zuccarello, P., Grasso, A., Copat, C., y Ferrante, M. (2017). Fitorremediación de suelos contaminados por metales pesados y HAP. Una breve

revisión. *Environmental Technology and Innovation*, 8, 309-326.
<https://doi.org/10.1016/j.eti.2017.08.002>.

De La Cruz, C. (2021). *Niveles de contenido de Plomo y Zinc en órganos no reproductivos de Polylepis sp. en tres localidades de Pasco*. [Tesis de Maestría, Universidad Nacional del Centro del Perú]. <http://hdl.handle.net/20.500.12894/7671>

Delgadillo-López, A. E., González-Ramírez, C. A., Prieto-García, F., Villagómez-Ibarra, J. R., y Acevedo-Sandoval, O. (2011). Fitorremediación: una alternativa para eliminar la contaminación. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 14(2), 597-612.
scielo.org.mx

Di Stasio, L., Gentile, A., Tangredi, DN, Piccolo, P., Oliva, G., Vigliotta, G., Cicatelli, A., Guarino, F., Guidi Nissim, W., Labra, M. y Castiglione, S. (2025). Fitorremediación urbana: una solución basada en la naturaleza para la recuperación y la sostenibilidad ambiental. *Plantas*, 14 (13), 2057. <https://doi.org/10.3390/plants14132057>

Ejaz, U., Khan, S., Khalid, N., Ahmad, Z., Jehangir, S., Rizvi, Z., Lho, L., Han, H., y Raposo, A. (2023). Desintoxicación de metales pesados: un estudio multifacético de estrategias de tolerancia contra la toxicidad de metales pesados en plantas. *Frontiers in Plant Science*, 14. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1154571>.

El-Sappah, A., Zhu, Y., Huang, Q., Chen, B., Soaud, S., Elhamid, M., Yan, K., Li, J., y El-Tarabily, K. (2024). Comportamiento molecular de las plantas ante metales pesados: de la criticidad a la toxicidad. *Frontiers in Plant Science*, 15. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1423625>.

Erdal, I., Aktas, H., Yaylacı, C., Türkan, S., Aydın, G. y Hor, Y. (2023). Efectos de combinaciones de sustratos a base de turba sobre la nutrición mineral, el crecimiento y el rendimiento del tomate. *Revista de Nutrición Vegetal*, 47, 30 - 48. <https://doi.org/10.1080/01904167.2023.2265969>.

FAO y PNUMA (2022). Evaluación Mundial de la Contaminación del suelo - Resumen para formuladores de políticas. Roma, FAO,84. <https://doi.org/10.4060/cb4827es>

Feki, K., Tounsi, S., Mrabet, M., Mhadhbi, H., y Brini, F. (2021). Avances recientes en los mecanismos fisiológicos y moleculares de la acumulación de metales pesados en plantas. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 64967 - 64986. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16805-y>.

Flores Flores, G. S. (2017). *Biogeografía de un bosque alto andino: historia e impactos del cambio climático en los queñuales peruanos*. [Tesis de grado, Pontificia Universidad Católica del Perú]. <http://hdl.handle.net/20.500.12404/9057>

Frostman, T. (2020). Un enfoque de tratamiento de turba/humedales para la mitigación del drenaje ácido de minas. 197-200. <https://doi.org/10.1201/9781003069997-23>.

Gama, Y. (2019). La Fitorremediación como Alternativa en la Recuperación de Suelos Afectados con Desmontes de Construcción – Cajabamba. [Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Cajamarca]. <http://hdl.handle.net/20.500.14074/3489>

Gastañadui-Cruz, JC, Reyes-Lopez, IA, Cortijo-García, A., Portilla-Rodríguez, HR, Bush, JA, Vanneste, J. y García-Chevesich, PA (2024). Neutralización de efluentes de lodos

de alta densidad con dióxido de carbono como alternativa sostenible para el clima y la calidad del agua al uso de ácidos minerales fuertes. *Sustainability*, 16 (23), 10363.

<https://doi.org/10.3390/su162310363>

Ghori, N., Ghori, T., Hayat, M., Imadi, S., Gul, A., Altay, V., y Ozturk, M. (2019). Estrés por metales pesados y respuestas en plantas. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 16, 1807-1828. <https://doi.org/10.1007/s13762-019-02215-8>.

Ghuge, S., Nikalje, G., Kadam, U., Suprasanna, P., y Hong, J. (2023). Mecanismos integrales de toxicidad de metales pesados en plantas, desintoxicación y remediación. *Journal of hazard materials*, 450, 131039. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.131039>.

Gomes, P. y Valente, T. (2024). Impacto estacional del drenaje ácido de minas en la calidad del agua y el riesgo ecológico potencial en una antigua explotación de sulfuros. *Environmental Science and Pollution Research International*, 31, 21124-21135. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-32367-1>

Grabiel, K.L. y Taípe, M.R. (2024). *Acumulación de metales pesados en Polylepis racemosa Ruiz & Pavon, Buddleja coriacea Remy y Baccharis latifolia Ruiz & Pavon en sustratos tratados con relave minero*. [Tesis de grado, Universidad Nacional del Centro del Perú]. <http://hdl.handle.net/20.500.12894/11415>

Gualavisí Quimbiamba L. G. (2008). *Comportamiento de Polylepis racemosa en vivero mediante propagación vegetativa utilizando cuatro longitudes de estacas en platabandas a nivel en tres diferentes pisos altitudinales Cayambe 2008*. [Tesis de

grado, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador].
<https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/6750>

Guamba, J., Corredor, D., Galárraga, C., Herdoiza, J., Santillán, M., y Segovia-Salcedo, M. (2021). Morfometría geométrica de estructuras vegetales como herramienta fenotípica para diferenciar *Polylepis incana* Kunth. y *Polylepis racemosa* Ruiz & Pav. reforestadas conjuntamente en Ecuador. *Neotropical Biodiversity*, 7, 121 - 134. <https://doi.org/10.1080/23766808.2021.1906138>.

Guzmán, A. (2021). *Fitorremediación de suelos contaminados con arsénico, cobre y plomo empleando Echeveria elegans y Crassula ovata*. [Tesis de maestría, Universidad Autónoma Metropolitana - México]. <https://doi.org/10.24275/uama.6734.8738>

Halim, M., Ibrahim, A., Izhar, T., Ismail, S., y Jaafar, Z. (2020). Suelo de turba para el tratamiento de drenaje ácido sintético de minas: estudio de características. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 616. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/616/1/012069>.

Haro, S., Arcos, J., Guallpa, M. y Guaraca, H. (2018). Efecto de la aplicación de solución nutritiva para el crecimiento inicial de *Polylepis racemosa* a nivel de vivero. 9, 198-207. <https://doi.org/10.29019/ENFOQUEUTE.V9N2.207>

Hassan, S., Bhadwal, S., Khan, M., S., Nissa, K., Shah, R., Bhat, H., Bhat, S., Lone, I. y Ganai, B. (2024). Revitalización de terrenos contaminados: una revisión del estado del arte sobre la remediación de relaves mineros mediante fitorremediación y

- enfoques genómicos. *Chemosphere*, 356, 141889.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141889>
- Hossain, M., Piyatida, P., Silva, J., y Fujita, M. (2012). Mecanismo molecular de la toxicidad y tolerancia a metales pesados en plantas: papel central del glutatión en la desintoxicación de especies reactivas de oxígeno y metilglioxal y en la quelación de metales pesados. *Journal of Botany*, 2012, 1-37.
<https://doi.org/10.1155/2012/872875>.
- Hosseinniaee, S., Jafari, M., Tavili, A., Zare, S., Cappai, G. y De Giudici, G. (2022). Perspectivas de la capacidad de fitorremediación de plantas nativas que crecen en el complejo minero de Pb-Zn de Angouran, en el noroeste de Irán. *Journal of environmental management*, 315, 115184.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115184>
- Huang, B., Yuan, Z., Li, D., Zheng, M., Nie, X. y Liao, Y. (2020). Efectos del tamaño de las partículas del suelo en la adsorción, distribución y migración de metales pesados (loides) en el suelo: una revisión. *Ciencias ambientales: Procesos e impactos*. 22, 1596-1615. <https://doi.org/10.1039/d0em00189a>
- Huang, W., Zhang, C., Zhu, B., Liu, X., Xiao, H., Liu, S. y Shao, H. (2025). Evaluación sistemática de la eficiencia de acumulación de metales/metaloides en plantas: una síntesis global de factores de bioacumulación y translocación. *Frontiers in Plant Science*. 16. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1602951>

- Huaranga, F., Méndez, E., Quilcat, V., Bernui, F., Costilla, N., y Huaranga, A., F. (2021). Fitoextracción de Pb y Cd, presentes en suelos agrícolas contaminados por metales pesados por el rabo de zorro *Lolium multiflorum* L. (Poaceae). *Arnaldoa*, 28(1), 149–162. <http://doi.org/10.22497/arnaldoa.281.28109>
- Huslina, F., Khudur, LS, Shah, K., Surapaneni, A., Netherway, P. y Ball, AS (2024). Restauración de yacimientos mineros: Fitorremediación de suelos contaminados con arsénico. *Environments*, 11 (5), 99. <https://doi.org/10.3390/environments11050099>
- Kafle, A., Timilsina, A., Gautam, A., Adhikari, K., Bhattarai, A. y Aryal, N. (2022). Fitorremediación: mecanismos, selección y mejora de plantas mediante agentes naturales y sintéticos. *Environmental Advances*, 8, 100203. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2022.100203>
- Kessler, M., y Schmidt-Lebuhn, A. N. (2006). Taxonomical and distributional notes on *Polylepis* (Rosaceae). *Organisms diversity and evolution*, 6(1), 67-70. [10.1016/j.ode.2005.04.001](https://doi.org/10.1016/j.ode.2005.04.001)
- Kicińska, A., Pomykała, R., e Izquierdo, M. (2021). Cambios en el pH del suelo y movilidad de metales pesados en suelos contaminados. *Revista Europea de Ciencias del Suelo*, 73(1). <https://doi.org/10.1111/ejss.13203>
- Kushwaha, A., Rani, R., Kumar, S., y Gautam, A. (2016). Mecanismos de desintoxicación y tolerancia a metales pesados en plantas: Implicaciones para la fitorremediación. *Environmental Reviews*, 24, 39-51. <https://doi.org/10.1139/er-2015-0010>

- Kuyucak, N. (2021). El agua en la minería y el medio ambiente para la sostenibilidad. *Mine Water and the Environment*, 40, 815-817. <https://doi.org/10.1007/s10230-021-00814-x>.
- Leguizamo, M., Gómez, W., y Sarmiento, M. (2017). Especies herbáceas nativas con potencial para la fitorremediación de metales pesados: una revisión de los humedales. *Chemosphere*, 168, 1230-1247. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.10.075>
- Li, C., Li, M., Zeng, J., Yuan, S., Luo, X., Wu, C. y Xue, S. (2023). Características de migración y distribución de metales pesados del suelo en una fundición de plomo. *Revista de Ciencias Ambientales*, 135, 600-609. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2023.02.007>
- Li, G., Yan, L., Chen, X., Lam, S., Rinklebe, J., Yu, Q., Yang, Y., Peng, W. y Sonne, C. (2023). Fitorremediación de cadmio en suelo, aire y agua. *Chemosphere*, 320, 138058. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138058>
- Li, Q., Wang, Y., Li, Y., Li, L., Tang, M., Hu, W., Chen, L. y Ai, S. (2022). Especiación de metales pesados en suelos y su inmovilización en interfaces a microescala entre diversos componentes del suelo. *Science of The Total Environment*, 825, 153862. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153862>
- Li, Y., Zhang, J., Lv, Y., Garland, G., Xu, J. y Liu, X. (2025). Transporte competitivo de metales pesados en el suelo: dinámica del cadmio con modelado numérico. *Journal of dangerous materials*, 495, 138923. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2025.138923>

- Liu, W., Hu, T., Mao, Y., Shi, M., Cheng, C., Zhang, J., Qi, S., Chen, W. y Xing, X. (2022). Investigación mecanicista del fraccionamiento geoquímico, la biodisponibilidad y la cinética de liberación de metales pesados en el suelo contaminado de una fundición de cobre típica. *Environmental Pollution*, 306, 119391. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119391>
- Mackie, A., y Walsh, M. (2015). Comparación a escala de laboratorio de procesos de tratamiento de clarificación convencionales y de alta velocidad para drenaje ácido de minas. *Water Quality Research Journal of Canada*, 50, 279-286. <https://doi.org/10.2166/wqrjc.2015.048>.
- Mahar, A., Wang, P., Ali, A., Awasthi, M., Lahori, A., Wang, Q., Li, R., & Zhang, Z. (2016). Desafíos y oportunidades en la fitorremediación de suelos contaminados con metales pesados: una revisión. *Ecotoxicología y seguridad ambiental*, 126, 111-121. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2015.12.023>.
- Mezei, A., y Cañizares, M. (2012). *Alternativas de tratamiento de agua para soluciones de drenaje ácido de roca de la mina Pierina* (Project N° 13479-003). SGS Minerals Services
- Midolo, G. y Wellstein, C. (2020). El rendimiento y la supervivencia de las plantas en experimentos de trasplante dependen de los cambios de temperatura y precipitación con la altitud. *Journal of Ecology*, 108, 2107-2120. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.13387>

- Mohamed, H., Ullah, I., Toor, M., Tanveer, N., Din, M., Basit, A., Sultan, Y., Muhammad, M., y Rehman, M. (2025). Toxicidad de metales pesados en plantas: comprensión de los mecanismos y desarrollo de estrategias de afrontamiento para la remediación: una revisión. *Bioresources and Bioprocessing*, 12. <https://doi.org/10.1186/s40643-025-00930-4>.
- Munive, R., Gamarra, G., Munivei, Y., Puertas, F., Valdiviezo, L., y Cabello, R. (2020). Absorción de plomo y cadmio por girasol de un suelo contaminado y remediado con enmiendas orgánicas en forma de compost y vermicompost. *Scientia Agropecuaria*, 11(2), 177–186. <https://doi.org/10.17268/SCI.AGROPECU.2020.02.04>
- Nie, Z., Luo, J., Tang, J., Li, B., Chen, B., Gao, M., Wang, X. y Guo, L. (2025). Fuentes de contaminación, características y evaluación del riesgo ambiental de metales pesados en aguas superficiales y sedimentos de una mina de pirita típica en el suroeste de China. *Journal of Environmental Sciences*, 157, 742-755. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2025.01.008>
- Ningombam, L., Hazarika, B., Yumkhaibam, T., Heisnam, P., & Singh, Y. (2024). Inducción de tolerancia al estrés en plantas mediante metales pesados: descifrando mecanismos fisiológicos, bioquímicos, moleculares y ómicos. *South African Journal of Botany*. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2024.02.032>.
- Paredes, J. (2018). Evaluación de la aplicabilidad de especies forestales de la serranía peruana en fitorremediación de relaves mineros. *ECIPerú*, 11(2), 5. <https://doi.org/10.33017/REVECIPERU2014.0013/>

- Patra, S., Sengupta, S., Das, S. y Mazumdar, D. (2025). Evaluación de la interacción del cobre y el zinc con el cadmio para reducir su toxicidad en suelos de cuencas fluviales contaminados con metales pesados. *Discover Soil*, 2(2), 13. <https://doi.org/10.1007/s44378-025-00030-x>
- Peña, S. y Beltrán, N. (2019). Aplicación de la fitorremediación en suelos contaminados por metales pesados utilizando *Helianthus annuus* L. en la estación experimental El Mantaro. *Prospectiva Universitaria En Ingeniería Y Tecnología*, 9(1), 31-45. <http://revistas.uncp.edu.pe/index.php/prospectiva/article/view/34>
- Pikula, D. y Stepień, W. (2021). Efecto del grado de contaminación del suelo con metales pesados en su movilidad en el perfil del suelo en un experimento de microparcels. *Agronomía*, 11(5), 878. <https://doi.org/10.3390/agronomy11050878>
- Pivovarov, A., Pasquini, S., Guzman, M., Alstad, K., Stemke, J. y Santiago, L. (2016). Múltiples estrategias de supervivencia a la sequía en especies de plantas leñosas. *Functional Ecology*, 30, 517-526. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.12518>
- Prabakaran, K., Li, J., Anandkumar, A., Leng, Z., Zou, C. y Du, D. (2019). Gestión de la contaminación ambiental mediante fitorremediación por plantas invasoras: Una revisión. *Ingeniería Ecológica*, 138, 28-37. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.07.002>
- Radovanovic, V., Djekic, I. y Zarkovic, B. (2020). Características de la acumulación y transferencia de cadmio y plomo por *Chenopodium quinoa* Will. *Sustainability*, 12 (9), 3789. <https://doi.org/10.3390/su12093789>

- Rai, PK, Lee, SS, Zhang, M., Tsang, YF y Kim, KH (2019). Metales pesados en cultivos alimentarios: riesgos para la salud, destino, mecanismos y gestión. *Environment International*, 125, 365-385. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.01.067>
- Raklami, A., Meddich, A., Oufdou, K. y Baslam, M. (2022). Plantas: Biorremediación basada en microorganismos para la limpieza de metales pesados: Desarrollos recientes, técnicas de fitorremediación, mecanismos de regulación y respuestas moleculares. *Revista Internacional de Ciencias Moleculares*, 23(9), 5031. <https://doi.org/10.3390/ijms23095031>
- Ramachandran, P., Ramirez, A., y Dinneny, J. (2024). Enraizamiento para la supervivencia: cómo las plantas afrontan entornos desafiantes mediante la diversidad de formas y funciones de sus raíces. *Plant Physiology*, 197(1), 586. <https://doi.org/10.1093/plphys/kiae586>
- Rambabu, K., Banat, F., Pham, Q., Ho, S., Ren, N. y Show, P. (2020). Remediación biológica del drenaje ácido de minas: Revisión de tendencias pasadas y perspectivas actuales. *Environmental Science and Ecotechnology*, 2. <https://doi.org/10.1016/j.ese.2020.100024>
- Ramírez, A., García, G., Werner, O., Navarro-Pedreño, J., y Ros, RM (2021). Implicaciones de la fitorremediación de la contaminación por metales pesados en suelos y plantas silvestres en la zona industrial de Haina, República Dominicana. *Sustainability*, 13 (3), 1403. <https://doi.org/10.3390/su13031403>

- Ranauda, M., Prigioniero, A., Ortega, M., Gizzi, G., Fosso, E., Maisto, M., Zuzolo, D., Tartaglia, M., y Guarino, C. (2025). Poaceae en fitorremediación: una revisión sistemática del conocimiento actual, tendencias de investigación y perspectivas sobre rasgos vegetales útiles. *Journal of dangerous materials*, 496, 139225. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2025.139225>
- Rashid, A., Schutte, B., Ulery, A., Deyholos, M., Sanogo, S., Lehnhoff, E., y Beck, L. (2023). Contaminación por metales pesados en suelos agrícolas: contaminantes ambientales que afectan la salud de los cultivos. *Agronomía*. <https://doi.org/10.3390/agronomy13061521>.
- Raza, A., Habib, M., Kakavand, SN, Zahid, Z., Zahra, N., Sharif, R. y Hasanuzzaman, M. (2020). Fitorremediación de cadmio: Mecanismos fisiológicos, bioquímicos y moleculares. *Biology*, 9 (7), 177. <https://doi.org/10.3390/biology9070177>
- Reynel, C., y Marcelo, J. (2009). Árboles de los ecosistemas forestales andinos. Manual de identificación de especies. Programa Regional para la Gestión Social de Ecosistemas Forestales Andinos – ECOBONA, 163. INTERCOOPERATION FUNDACION SUIZA PARA EL DESARROLLO Y COOPERACION INTERNACIONAL. Perú. <https://sinia.minam.gob.pe//sites/default/files/siar-puno/archivos/public/docs/1526.pdf>
- Riyazuddin, R., Nisha, N., Ejaz, B., Khan, M., Kumar, M., Ramteke, P., & Gupta, R. (2021). Una revisión exhaustiva sobre la toxicidad y el secuestro de metales pesados en plantas. *Biomolecules*, 12. <https://doi.org/10.3390/biom12010043>.

- Rizwan, M., Ali, S., Hussain, A., Ali, Q., Shakoor, M., Zia-Ur-Rehman, M., Farid, M. y Asma, M. (2017). Efecto del zinc-lisina en el crecimiento, el rendimiento y la absorción de cadmio en trigo (*Triticum aestivum* L.) y evaluación del riesgo para la salud. *Chemosphere*, 187, 35-42. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.08.071>
- Rosero Coello, J. (2014). *Evaluación de dos fertilizantes de lenta liberación en la propagación asexual del yagual (Polylepis racemosa) en la comunidad San José del Guanto, Cantón Quero, Tungurahua*. [Tesis de grado, Universidad Técnica de Cotopaxi – Ecuador]. <https://redi.cedia.edu.ec/document/227139>
- Rotowa, O., Małek, S., Jasik, M., y Staszal-Szlachta, K. (2025). El sustrato y la fertilización utilizados en el vivero influyen en la biomasa y la asignación de nutrientes en plántulas de *Fagus sylvatica* y *Quercus robur* después del primer año de crecimiento en un bosque recién establecido. *Forests*. <https://doi.org/10.3390/f16030511>.
- Saleem, M.H., Ali, S., Rehman, M., Hasanuzzaman, M., Rizwan, M., Irshad, Qari, S.H. (2020) Jute: A potential candidate for phytoremediation of metals-a review. *Plants* (Basel), 9(2), 258. <https://doi.org/10.3390/plants9020258>
- Santos, D., Delgado, R., Romero, A., y Castro, A. (2023). *Fitorremediación de metales pesados en ambientes contaminados: una revisión*. In Centro de Investigación en Biotecnología Aplicada CIBA-IPN, México. (Vol. 233, 18–24 pp.). <https://www.revistafronterabiotecnologica.cibatlaxcala.ipn.mx/volumen/vol26/pdf/vol-26-4.pdf>

- Seregin, I., y Kozhevnikova, A. (2025). Respuestas de las plantas a los metales pesados: de la deficiencia al exceso. *International Journal of Molecular Sciences*, 26. <https://doi.org/10.3390/ijms26052064>.
- Shah, V. y Daverey, A. (2020). Fitorremediación: Un enfoque multidisciplinario para la limpieza de suelos contaminados con metales pesados. *Tecnología e Innovación Ambiental*, 18, 100774. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.100774>
- Shahid, M., Shamshad, S., Rafiq, M., Khalid, S., Bibi, I., Niazi, N., Dumat, C., y Rashid, M. (2017). Especiación, biodisponibilidad, absorción, toxicidad y desintoxicación del cromo en el sistema suelo-planta: una revisión. *Chemosphere*, 178, 513-533. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.03.074>.
- Sharma, J., Kumar, N., Singh, N., y Santal, A. (2023). Tecnologías de fitorremediación y su mecanismo para la eliminación de metales pesados de suelos contaminados: Un enfoque para un medio ambiente sostenible. *Frontiers in Plant Science*, 14. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1076876>
- Shi, B., Yang, R., Tian, W., Lu, M. y Wang, X. (2024). Factores que influyen en la acumulación de cadmio en plantas tras la inoculación con rizobacterias: un metaanálisis. *The Science of the Total Environment*, 916, 170277. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170277>
- Shivappa, S., Amritha, K., Nayak, S., Chandrashekar, H., Thorat, S., Kaniyassery, A., Govender, N., Thiruvengadam, M., & Muthusamy, A. (2025). Integración de enfoques fisio-bioquímicos, biológicos y moleculares para mejorar la tolerancia a

- metales pesados en plantas. *3 Biotech*, 15. <https://doi.org/10.1007/s13205-025-04248-y>.
- Silva Mori, K. (2022). *Utilización de las especies *Medicago sativa* y *Taraxacum officinale* en la fitorremediación de plomo, mercurio y cadmio del botadero Yacucatina*. [Tesis de grado, Universidad Nacional de San Martín – Tarapoto]. <http://hdl.handle.net/11458/4463>
- Singh, S., Parihar, P., Singh, R., Singh, V., y Prasad, S. (2016). Tolerancia a metales pesados en plantas: papel de la transcriptómica, la proteómica, la metabolómica y la ionómica. *Frontiers in Plant Science*, 6. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.01143>.
- Singh, S., Yadav, V., Arif, N., Singh, V., Dubey, N., Ramawat, N., Prasad, R., Sahi, S., Tripathi, D., y Chauhan, D. (2020). Estrés por metales pesados y vida vegetal: mecanismos de absorción, toxicidad y mitigación., 271-287. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-818204-8.00001-1>.
- Skuza, L., Szućko-Kociuba, I., Filip, E., & Bożek, I. (2022). Mecanismos moleculares naturales de hiperacumulación e hipertolerancia de las plantas hacia metales pesados. *International Journal of Molecular Sciences*, 23. <https://doi.org/10.3390/ijms23169335>.
- Sorour, A., Badr, R., Mahmoud, N. y Abdel-Latif, A. (2024). Acumulación y tolerancia al cadmio y al zinc en dos cultivares egipcios (S53 y V120) de *Helianthus annuus* L. como potenciales fitorremediadores. *International Journal of Phytoremediation*, 26, 1643-1654. <https://doi.org/10.1080/15226514.2024.2343842>

- Stefanowicz, A., Kapusta, P., Zubek, S., Stanek, M. y Woch, M. (2020). La materia orgánica del suelo prevalece sobre la contaminación por metales pesados y la vegetación como factor que configura las comunidades microbianas del suelo en yacimientos históricos de minería de Zn-Pb. *Chemosphere*, 240, 124922. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124922>
- Stuepp, C., Wendling, I., Xavier, A. y Zuffellato-Ribas, K. (2018). Propagación vegetativa y aplicación de la silvicultura clonal en especies arbóreas nativas brasileñas. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. <https://doi.org/10.1590/s0100-204x2018000900002>.
- Sukati, BH, De Jager, PC, Annandale, JG y Tanner, PD (2018). El estado de peligro de los lodos de alta densidad provenientes de la neutralización del drenaje ácido de minas. *Sustainability*, 10 (11), 4185. <https://doi.org/10.3390/su10114185>
- Sytar, O., Ghosh, S., Malínská, H., Živčák, M., y Brestič, M. (2020). Mecanismos fisiológicos y moleculares de la acumulación de metales en plantas hiperacumuladoras. *Physiologia plantarum*, 173(1), 148-166. <https://doi.org/10.1111/ppl.13285>
- Thakur, M., Praveen, S., Divte, P., Mitra, R., Kumar, M., Gupta, C., Kalidindi, U., Bansal, R., Roy, S., Anand, A., y Singh, B. (2021). Tolerancia a los metales en las plantas: la interfaz molecular y fisicoquímica determina el "efecto no tan pesado" de los metales pesados. *Chemosphere*, 287 Pt 1, 131957. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131957>.

- Torrico Garcés, J. L. (2022). *Tratamiento de Agua Residual Ácida por Tecnología de Lodos de Alta Densidad en la Mina Barrick – Pierina*. [Tesis de grado, Universidad Nacional del Callao – Perú]. <https://hdl.handle.net/20.500.12952/7181>
- Uchimiya, M., Bannon, D., Nakanishi, H., McBride, M., Williams, M. y Yoshihara, T. (2020). Especiación química, absorción vegetal y toxicidad de metales pesados en suelos agrícolas. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 68, 12856–12869. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.0c00183>
- Usman, M., Zia-Ur-Rehman, M., Rizwan, M., Abbas, T., Ayub, M., Naeem, M., Alharby, H., Alabdallah, N., Alharbi, B., Qamar, M. y Ali, S. (2022). Efecto de la textura del suelo y las nanopartículas de óxido de zinc en el crecimiento y la acumulación de cadmio en el trigo: un estudio del ciclo de vida. *Environmental Research*, 114397. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114397>
- Valladares Perez, D. N. (2019). Análisis del efecto de borde en los bosques del género *Polylepis* en la quebrada Llaca, Huaraz – Ancash, 2017. [Tesis de grado, Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo, Perú]. <http://repositorio.unasam.edu.pe/handle/UNASAM/3621>
- Veliz Ávila, G. (2022). Uso del Suelo con Presencia de Metales Pesados y su Influencia en Forrajes Del Pasivo Ambiental de La Minera Azulcocha - 2022. [Tesis de posgrado, Universidad Nacional del Centro del Perú]. <http://hdl.handle.net/20.500.12894/8752>
- Violante, A., Cozzolino, V., Perelomov, L., Caporale, A., y Pigna, M. (2010). MOBILITY AND BIOAVAILABILITY OF HEAVY METALS AND METALLOIDS IN SOIL

ENVIRONMENTS. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 10, 268-292.
<https://doi.org/10.4067/s0718-95162010000100005>.

Vizconde, J. (2023). La fitorremediación de suelos contaminados por relaves mineros a través de *Dactylis glomerata* y *Pennisetum clandestinum*. *Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas*, 26(52), 1–9. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v26i52.25283>

Wan, Y., Liu, J., Zhong, Z., Wang, Q. y Li, H. (2024). Metales pesados en suelos agrícolas: fuentes, factores influyentes y estrategias de remediación. *Toxics*, 12 (1), 63. <https://doi.org/10.3390/toxics12010063>.

Wang, B., Hou, J., Wu, X., Niu, X. y Zhou, F. (2024). Evaluación del potencial de fitorremediación: plantas dominantes en suelos afectados por la minería polimetálica (o polimetálica). *Processes*, 12 (4), 833. <https://doi.org/10.3390/pr12040833>

Wang, F., Li, W., Wang, H., Hu, Y. y Cheng, H. (2024). El comportamiento de lixiviación de metales pesados de suelos mineros contaminados: el efecto de las condiciones de lluvia y el impacto en las tierras agrícolas circundantes. *Science of The Total Environment*, 914, 169877. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.169877>

Wani, K., Naeem, M., & Aftab, T. (2022). Cromo en el nexo planta-suelo: especiación, absorción, transporte y técnicas de remediación sostenible. *Contaminación ambiental*, 120350. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120350>.

- Wenzel, W. W. (2009). Procesos y gestión de la rizosfera en la biorremediación asistida por plantas (Fitorremediación) de suelos. *Plant and Soil*, 321, 385-408. <http://dx.doi.org/10.1007/s11104-008-9686-1>
- Wieczorek, J., Baran, A., y Bubak, A. (2023). Movilidad, bioacumulación en plantas y evaluación de riesgos de metales en suelos. *The Science of the total environment*, 163574. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163574>.
- Wyszkowska, J., Borowik, A., Kucharski, A. y Kucharski, J. (2012). Efecto del cadmio, cobre y zinc sobre las plantas, los microorganismos del suelo y las enzimas del suelo. *Journal of Elementology*, 18, 769-796. <https://doi.org/10.5601/jelem.2013.18.4.455>
- Xu, D., Shen, Z., Dou, C., Dou, Z., Li, Y., Gao, Y., y Sun, Q. (2022). Efectos de las propiedades del suelo en la biodisponibilidad y acumulación de metales pesados en granos de cultivos bajo diferentes patrones de uso de tierras agrícolas. *Scientific Reports*, 12. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-13140-1>.
- Xu, L., Xing, X., Liang, J., Peng, J. y Zhou, J. (2019). Fitorremediación in situ de cobre y cadmio en un suelo contaminado simultáneamente y sus efectos biológicos y físicos. *RSC Advances*, 9, 993-1003. <https://doi.org/10.1039/c8ra07645f>
- Yaashikaa, P., Kumar, P., Jeevanantham, S. y Saravanan, R. (2022). Una revisión sobre un enfoque de biorremediación para la desintoxicación y acumulación de metales pesados en plantas. *Contaminación ambiental*, 301, 119035. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119035>

- Yan, A., Wang, Y., Tan, S., Yusof, M., Ghosh, S., & Chen, Z. (2020). Fitorremediación: un enfoque prometedor para la revegetación de tierras contaminadas con metales pesados. *Frontiers in Plant Science*, 11. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00359>.
- Yang, J., Guo, Z., Jiang, L., Sarkodie, E., Li, K., Shi, J., Deng, Y., Zhang, Z., Liu, H., Liang, Y., Yin, H., y Liu, X. (2022). Contaminación por cadmio, plomo y arsénico en una fundición de metales no ferrosos abandonada en el sur de China: especiación química y movilidad. *Ecotoxicología y seguridad ambiental*, 239, 113617. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.113617>
- Yin, Y., Wang, X., Hu, Y., Li, F. y Cheng, H. (2022). Estructura de la comunidad bacteriana del suelo en hábitats con diferentes niveles de contaminación por metales pesados en una mina polimetálica abandonada. *Journal of dangerous materials*, 442, 130063. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.130063>
- Zandalinas, S., Sengupta, S., Fritschi, F., Azad, R., Nechushtai, R. y Mittler, R. (2020). El impacto de la combinación de factores de estrés en el crecimiento y la supervivencia de las plantas. *The New Phytologist*, 230, 1034-1048. <https://doi.org/10.1111/nph.17232>
- Zhakypbek, Y., Kossalbayev, B., Belkozhayev, A., Murat, T., Tursbekov, S., Abdalimov, E., Pashkovskiy, P., Kreslavski, V., Kuznetsov, V. y Allakhverdiev, S. (2024). Reducción de la contaminación por metales pesados en el suelo y el agua mediante fitorremediación. *Plantas*, 13(11), 1534. <https://doi.org/10.3390/plants13111534>.

Zhao, M., Zeng, S., Liu, S., Li, Z. y Jing, L. (2020). Acumulación de metales por plantas que crecen en China: capacidad, sinergia y efectos moderadores. *Ingeniería Ecológica*, 148, 105790. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.105790>

Zheng, S., Wang, Q., Yu, H., Huang, X. y Li, F. (2020). Efectos interactivos de múltiples metales pesados (metaloides) sobre su biodisponibilidad en suelos de arrozales contaminados en una amplia región. *Science of the Total Environment*, 708, 135126. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135126>

Anexo 2.

Informe de ensayo fisicoquímico del lodo



Instituto Nacional de Innovación Agraria

LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR
EL ORGANISMO DE ACREDITACIÓN INACAL - DA
CON REGISTRO N° LE - 200



Registro N° LE - 200

INFORME DE ENSAYO
N° 091032-24 / SU / LABSAF - BAÑOS DEL INCA

I. INFORMACIÓN GENERAL

Cliente : LENIN ROJAS RODRIGUEZ
Propietario / Productor : LENIN ROJAS RODRIGUEZ
Dirección del cliente : JR. JESUS NAZARET 134 - CAJAMARCA
Solicitado por : CLIENTE
Muestreado por : CLIENTE
Número de muestra(s) : 1
Producto declarado : Suelo
Presentación de las muestras(s) : BOLSA DE PLÁSTICO
Referencia del muestreo : RESERVADO POR EL CLIENTE
Procedencia de muestra(s) : PULAN - SANTA CRUZ - CAJAMARCA
Fecha(s) de muestreo : 2024-08-01 (***)
Fecha de recepción de muestra(s) : 2024-09-21
Lugar de ensayo : LABSAF BAÑOS DEL INCA
Fecha(s) de análisis : Del 2024-08-22 al 2024-09-17
Cotización del servicio : 353-24-BI
Fecha de emisión : 2024-09-18

II. RESULTADO DE ANÁLISIS

ITEM	1						
Código de Laboratorio	SU2017-BI-24	-	-	-	-	-	-
Matriz Analizada	Suelo	-	-	-	-	-	-
Fecha de Muestreo	2024-08-01	-	-	-	-	-	-
Hora de Inicio de Muestreo (h) (***)	9:30	-	-	-	-	-	-
Condición de la muestra	Conservada	-	-	-	-	-	-
Código/identificación de la Muestra por el Cliente (***)	LODO (AMARILLO)	-	-	-	-	-	-
Ensayo	Unidad	LC	Resultados				
pH.	unid. pH	0,10	8,1	-	-	-	-
Acidez Intercambiable	cmol (+)/Kg	0,50	--	-	-	-	-
Aluminio Intercambiable	cmol (+)/Kg	0,50	--	-	-	-	-
Carbonato De Calcio Equivalente	%	0,50	8,4	-	-	-	-
Materia Organica	%	0,10	1,1	-	-	-	-
Fósforo Disponible	mg/kg	0,50	10,7	-	-	-	-
Conductividad Eléctrica	mS/m	1,00	288,0	-	-	-	-
Areña	%	-	****	-	-	-	-
Arcilla	%	-	****	-	-	-	-
Limo	%	-	****	-	-	-	-
Clase Textural	-	-	****	-	-	-	-
Potasio disponible (*)	mg/kg	0,50	254,3	-	-	-	-



Firmado digitalmente por:
CABRERA HOYOS Hector
Antonio FAU 20131385904 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 19/09/2024 10:39:22-0500



Red de Laboratorios de Suelos, Aguas y Foliaves
Acreditado con la Norma
NTP-ISO/IEC 17025:2017
LABSAF (Nombre)
Dirección: (Dirección del laboratorio)
Email: (correo de contacto del laboratorio)

F-46 / Ver.05
www.inia.gob.pe

Anexo 3.

Informe de ensayo de la concentración de metales pesados en turba



Instituto Nacional de Innovación Agraria

LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR
EL ORGANISMO DE ACREDITACIÓN INACAL - DA
CON REGISTRO N° LE - 200



Registra 0121 - 000

INFORME DE ENSAYO
N° 091033-24 / SU / LABSAF - BAÑOS DEL INCA

I. INFORMACIÓN GENERAL

Cliente : LENIN ROJAS RODRIGUEZ
 Propietario / Productor : LENIN ROJAS RODRIGUEZ
 Dirección del cliente : JR. JESUS NAZARET 134 - CAJAMARCA
 Solicitado por : CLIENTE
 Muestreado por : CLIENTE
 Número de muestra(s) : 1
 Producto declarado : Suelo
 Presentación de las muestras(s) : BOLSA DE PLÁSTICO
 Referencia del muestreo : RESERVADO POR EL CLIENTE
 Procedencia de muestra(s) : PULAN - SANTA CRUZ - CAJAMARCA
 Fecha(s) de muestreo : 2024-08-01 (***)
 Fecha de recepción de muestra(s) : 2024-09-21
 Lugar de ensayo : LABSAF BAÑOS DEL INCA
 Fecha(s) de análisis : Del 2024-08-22 al 2024-09-17
 Cotización del servicio : 354-24-BI
 Fecha de emisión : 2024-09-18

II. RESULTADO DE ANÁLISIS

ITEM	1					
Código de Laboratorio	SU2018-BI-24					
Matriz Analizada	Suelo					
Fecha de Muestreo	2024-08-01					
Hora de Inicio de Muestreo (h) (***)	9:30					
Condición de la muestra	Conservada					
Código/Identificación de la Muestra por el Cliente (***)	TURBA (OSCURO)					
Ensayo	Unidad	LC	Resultados			
pH	unid. pH	0,10	5,4	-	-	-
Acidez Intercambiable	cmol (+)/Kg	0,50	< LC	-	-	-
Aluminio Intercambiable	cmol (+)/Kg	0,50	< LC	-	-	-
Carbonato De Calcio Equivalente	%	0,50	--	-	-	-
Materia Organica	%	0,10	15,4	-	-	-
Fósforo Disponible	mg/kg	0,50	47,8	-	-	-
Conductividad Eléctrica	mS/m	1,00	17,4	-	-	-
Potasio disponible (*)	mg.kg-1	0,50	306,8	-	-	-



Firmado digitalmente por:
CABRERA HOYOS Hector
Antonio FAU 20131385994 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 19/09/2024 10:38:30-0500



Red de Laboratorios de Suelos, Aguas y Foliaves
Acreditado con la Norma
NTP-ISO/IEC 17025:2017
LABSAF (Nombre)
Dirección: (Dirección del laboratorio)
Email: (correo de contacto del laboratorio)

F-46 / Ver.05
www.inia.gob.pe

METALES TOTALES								
Aluminio (Al) (*)	mg.kg-1	0,05	6.595,37	-	-	-	-	-
Arsenico (As) (*)	mg.kg-1	0,05	5,00	-	-	-	-	-
Bario (Ba) (*)	mg.kg-1	0,05	91,94	-	-	-	-	-
Calcio (Ca) (*)	mg.kg-1	0,05	79.894,25	-	-	-	-	-
Cadmio (Cd) (*)	mg.kg-1	0,05	1,00	-	-	-	-	-
Cobalto (Co) (*)	mg.kg-1	0,05	<0,05	-	-	-	-	-
Cromo (Cr) (*)	mg.kg-1	0,05	12,99	-	-	-	-	-
Cobre (Cu) (*)	mg.kg-1	0,05	13,49	-	-	-	-	-
Hierro (Fe) (*)	mg.kg-1	0,05	185.773,39	-	-	-	-	-
Potasio (K) (*)	mg.kg-1	0,05	1.484,48	-	-	-	-	-
Magnesio (Mg) (*)	mg.kg-1	0,05	1.649,85	-	-	-	-	-
Manganeso (Mn) (*)	mg.kg-1	0,05	264,33	-	-	-	-	-
Molibdeno (Mo) (*)	mg.kg-1	0,05	<0,05	-	-	-	-	-
Sodio (Na) (*)	mg.kg-1	0,05	200,36	-	-	-	-	-
Niquel (Ni) (*)	mg.kg-1	0,05	14,99	-	-	-	-	-
Plomo (Pb) (*)	mg.kg-1	0,05	<0,05	-	-	-	-	-
Estroncio (Sr) (*)	mg.kg-1	0,05	117,92	-	-	-	-	-
Zinc (Zn) (*)	mg.kg-1	0,05	35,98	-	-	-	-	-

III. METODOLOGÍA DE ENSAYO

ENSAYO	NORMA DE REFERENCIA
pH	EPA Method 9045 D Rev. 4 2004 Soil and waste pH.
Acidez y Aluminio Intercambiable	Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. Segunda Sección (31 de Diciembre 2002). Ítem 7.3.29, AS-33 2002 Determinación de Acidez y Aluminio Intercambiable (AS-33 método de Cloruro de Potasio).
Carbonato De Calcio Equivalente	Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. Segunda Sección (31 de Diciembre 2002). Ítem 7.3.25, AS-29 2002 Determinación de los carbonatos de calcio equivalente (AS-29 Método de neutralización ácida).
Materia Orgánica	NOM-021-RECNAT-2000, 2da Sección. 2002, Ítem 7.1.7 AS-07 2002 Determinación de Materia Orgánica (AS-07 Walkley and Black).
Fósforo Disponible	Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. Segunda Sección (31 de Diciembre 2002). Ítem 7.1.10, AS-11 2002 Determinación de fósforo extraíble en suelos neutros y ácidos (AS 11 Método de Bray y Kurtz).
Potasio Disponible	Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. Segunda Sección (31 de Diciembre 2002). Ítem 7.1.12, AS-12 (EPA 6010 D. Revision 5. 2018). Validado (modificado y aplicado fuera del alcance)
Conductividad Eléctrica	ISO 11265:1994 / Cor 1:1996 1994 Soil quality -- Determination of the specific electrical conductivity
Textura	EPA Method 3050B. Revision. 2. 1996/ EPA Method 7000B. Revision 2. Determinación de la textura del suelo (AS-09 Método de Bouyoucos).
Metales Totales	EPA Method 3050B- ACID DIGESTION OF SEDIMENTS, SLUDGES, AND SOILS (Rev.2, 1996) / EPA 6010 D. Revision 5. 2018. Validado (aplicado fuera del alcance)

IV. CONSIDERACIONES

- Estado en las que ingreso la Muestras: Buenas Condiciones de almacenamiento
- Este informe no puede ser reproducido total, ni parcialmente sin la autorización de LABSAF y del cliente.
- Los resultados se relacionan solamente con los ítems sometidos a ensayo
- Los resultados se aplican a las muestras, tales como se recibieron
- Este documento es válido sólo para el producto mencionado anteriormente.
- El Laboratorio no es responsable cuando la información proporcionada por el cliente pueda afectar la validez de los resultados.
- Medición de pH realizada a 25 °C.
- Medición de Conductividad Eléctrica realizada a 25 °C.



Firmado digitalmente por:
CABRERA HOYOS Hector
Antonio FAU 20131365994 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 19/09/2024 10:38:37-0500

Anexo 4.

Informe de ensayo de la concentración de metales pesados en *P. racemosa*

Instituto Nacional de Innovación Agraria

INFORME DE ENSAYO
LABSAF BAÑOS DEL INCA
N° 040002-25NA / FO / BI
**I. INFORMACIÓN GENERAL**

Cliente	: LENIN ROJAS RODRIGUEZ
Propietario / Productor	: LENIN ROJAS RODRIGUEZ
Dirección del cliente	: JR. JESUS DE NAZARETH N° 134-CAJAMARCA
Solicitado por	: CLIENTE
Muestreado por	: CLIENTE
Referencia del muestreo	: RESERVADO POR EL CLIENTE
Procedencia de muestra(s) (***)	: PORCON ALTO - CAJAMARCA-CAJAMARCA-CAJAMARCA
Fecha(s) de muestreo (***)	: 2025-03-26
Fecha de recepción de muestra(s)	: 2025-03-27
Lugar de ensayo	: LABSAF BAÑOS DEL INCA
Fecha(s) de análisis	: Del 2025-03-28 al 2025-04-16
Cotización del servicio	: 104-25-BI
Fecha de emisión	: 2025-04-22

II. RESULTADO DE ANÁLISIS

ITEM			1					
Código de Laboratorio			FO0011-BI-25	-	-	-	-	-
Matriz Analizada			Foliare	-	-	-	-	-
Fecha de Muestreo (***)			2025-03-26	-	-	-	-	-
Hora de Inicio de Muestreo (h) (***)			11:50	-	-	-	-	-
Código/identificación de la Muestra por el Cliente (***)			Quinual	-	-	-	-	-
Ensayo	Unidad	LC	Resultados					
Metales Totales								
Aluminio (Al)	mg/kg	0,05	1393,02	-	-	-	-	-
Arsénico (As)	mg/kg	0,05	1,01	-	-	-	-	-
Bario (Ba)	mg/kg	0,05	70,75	-	-	-	-	-
Calcio (Ca)	mg/kg	0,05	16999,65	-	-	-	-	-
Cadmio (Cd)	mg/kg	0,05	1,01	-	-	-	-	-
Cobalto (Co)	mg/kg	0,05	2,01	-	-	-	-	-
Cromo (Cr)	mg/kg	0,05	3,02	-	-	-	-	-
Cobre (Cu)	mg/kg	0,05	14,05	-	-	-	-	-
Hierro (Fe)	mg/kg	0,05	1514,97	-	-	-	-	-
Potasio (K)	mg/kg	0,05	11369,80	-	-	-	-	-
Magnesio (Mg)	mg/kg	0,05	3630,46	-	-	-	-	-
Manganeso (Mn)	mg/kg	0,05	102,87	-	-	-	-	-
Molibdeno (Mo)	mg/kg	0,05	1,01	-	-	-	-	-
Sodio (Na)	mg/kg	0,00	225,81	-	-	-	-	-
Niquel (Ni)	mg/kg	0,05	<0,05	-	-	-	-	-
Plomo (Pb)	mg/Kg	0,05	7,00	-	-	-	-	-
Estroncio (Sr)	mg/kg	0,05	122,43	-	-	-	-	-
Zinc (Zn)	mg/kg	0,05	44,20	-	-	-	-	-



Red de Laboratorios de Suelos, Aguas y Foliare
 Acreditado con la Norma
 NTP-ISO/IEC 17025:2017

LABSAF (Nombre)
 Dirección: (Dirección del laboratorio)
 Email: (correo de contacto del laboratorio)

F-46 / Ver.06
www.inia.gob.pe

Anexo 5.

Informe de ensayo de la concentración de metales pesados en la biomasa aérea y radicular de *P. racemosa*

Instituto Nacional de Innovación Agraria

INFORME DE ENSAYO

N° 030001-25 / FO / LABSAF - BAÑOS DEL INCA

I. INFORMACIÓN GENERAL

Cliente	: INIA
Propietario / Productor	: LENIN ROJAS RODRIGUEZ
Dirección del cliente	: LENIN ROJAS RODRIGUEZ
Solicitado por	: JR. JESUS DE NAZARETH N° 134-CAJAMARCA
Muestreado por	: CLIENTE
Número de muestra(s)	: 10
Producto declarado	: Foliares
Presentación de las muestras(s)	: BOLSA DE PLÁSTICO
Referencia del muestreo	: RESERVADO POR EL CLIENTE
Procedencia de muestra(s)	: CAJAMARCA-CAJAMARCA- CAJAMARCA
Fecha(s) de muestreo	: 2025-01-08 (***)
Fecha de recepción de muestra(s)	: 2025-01-09
Lugar de ensayo	: LABSAF BAÑOS DEL INCA
Fecha(s) de análisis	: Del 2025-01-13 al 2024-03-04
Colización del servicio	: 011-24-BI
Fecha de emisión	: 2025-03-14

II. RESULTADO DE ANÁLISIS

ITEM	1	2	3	4	5	6		
Código de Laboratorio	FO0001-BI-25	FO0002-BI-25	FO0003-BI-25	FO0004-BI-25	FO0005-BI-25	FO0006-BI-25		
Matriz Analizada	Foliares	Foliares	Foliares	Foliares	Foliares	Foliares		
Fecha de Muestreo (***)	2025-01-08	2025-01-08	2025-01-08	2025-01-08	2025-01-08	2025-01-08		
Hora de inicio de Muestreo (h) (***)	15:00	15:00	15:00	15:00	15:00	15:00		
Condición de la muestra	Conservada	Conservada	Conservada	Conservada	Conservada	Conservada		
Código/Identificación de la Muestra por el Cliente (***)	T1-T	T2-T	T3-T	T4-T	T5-T	T1-R		
Ensayo	Unidad	LC	Resultados					
Metales								
Aluminio (Al)	mg.kg-1	0,05	143,00	278,00	163,00	302,00	192,00	2.733,00
Arsenico (As)	mg.kg-1	0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	1,00	2,00
Bario (Ba)	mg.kg-1	0,05	29,00	<0,05	21,00	<0,05	124,00	64,00
Calcio (Ca)	mg.kg-1	0,05	8.338,00	11.207,00	9.790,00	15.308,00	13.233,00	14.777,00
Cadmio (Cd)	mg.kg-1	0,05	-	-	-	-	1,00	1,00
Cobalto (Co)	mg.kg-1	0,05	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	3,00
Cromo (Cr)	mg.kg-1	0,05	1,00	-	-	-	1,00	2,00
Cobre (Cu)	mg.kg-1	0,05	20,00	11,00	10,00	22,00	22,00	71,00
Hierro (Fe)	mg.kg-1	0,05	819,00	250,00	380,00	624,00	1.348,00	2.132,00
Fósforo (P)	mg.kg-1	0,05	-	-	-	-	-	-
Potasio (K)	mg.kg-1	0,05	10.352,00	10.098,00	7.563,00	8.054,00	6.546,00	7.302,00
Magnesio (Mg)	mg.kg-1	0,05	29.400,00	35.080,00	28.180,00	22.670,00	27.610,00	35.590,00
Manganeso (Mn)	mg.kg-1	0,05	58,00	96,00	50,00	61,00	236,00	117,00
Molibdeno (Mo)	mg.kg-1	0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Sodio (Na)	mg.kg-1	0,05	910,00	670,00	1.020,00	620,00	1.360,00	3.210,00
Niquel (Ni)	mg.kg-1	0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Plomo (Pb)	mg.kg-1	0,05	3,00	2,00	3,00	3,00	3,00	3,00
Estroncio (Sr)	mg.kg-1	0,05	48,00	123,00	70,00	284,00	178,00	132,00
Zinc (Zn)	mg.kg-1	0,05	15,00	12,00	13,00	13,00	19,00	42,00



Red de Laboratorios de Suelos, Aguas y Foliares
Acreditado con la Norma
NTP-ISO/IEC 17025:2017
LABSAF (Nombre)
Dirección: (Dirección del laboratorio)
Email: (correo de contacto del laboratorio)



Instituto Nacional de Innovación Agraria

INFORME DE ENSAYO
N° 030001-25 / FO / LABSAF - BAÑOS DEL INCA

ITEM	7	8	9	10		
Código de Laboratorio	FO0007-BI-25	FO0008-BI-25	FO0009-BI-25	FO0010-BI-25		
Matriz Analizada	Foliares	Foliares	Foliares	Foliares		
Fecha de Muestreo (***)	2025-01-08	2025-01-08	2025-01-08	2025-01-08		
Hora de Inicio de Muestreo (h) (***)	15:00	15:00	15:00	15:00		
Condición de la muestra	Conservada	Conservada	Conservada	Conservada		
Código/Identificación de la Muestra por el Cliente (***)	T2-R	T3-R	T4-R	T5-R		
Ensayo	Unidad	LC	Resultados			
Aluminio (Al)	mg.kg-1	0,05	1.794,00	2.454,00	2.281,00	1.497,00
Arsenico (As)	mg.kg-1	0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Bario (Ba)	mg.kg-1	0,05	47,00	<0,05	43,00	<0,05
Calcio (Ca)	mg.kg-1	0,05	13.495,00	18.307,00	15.707,00	5.682,50
Cadmio (Cd)	mg.kg-1	0,05	1,00	2,00	1,00	1,00
Cobalto (Co)	mg.kg-1	0,05	3,00	5,00	5,00	2,00
Cromo (Cr)	mg.kg-1	0,05	2,00	4,00	2,00	1,00
Cobre (Cu)	mg.kg-1	0,05	111,00	318,00	199,00	18,50
Hierro (Fe)	mg.kg-1	0,05	3.437,00	7.461,00	5.510,00	1.535,00
Potasio (K)	mg.kg-1	0,05	7.228,00	4.972,00	6.730,00	6.943,00
Magnesio (Mg)	mg.kg-1	0,05	35.410,00	32.740,00	38.570,00	24.190,00
Manganeso (Mn)	mg.kg-1	0,05	128,00	248,00	205,00	54,00
Molibdeno (Mo)	mg.kg-1	0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Sodio (Na)	mg.kg-1	0,05	3.190,00	1.910,00	2.370,00	5.515,00
Niquel (Ni)	mg.kg-1	0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Plomo (Pb)	mg.kg-1	0,05	3,00	2,00	2,00	4,00
Estroncio (Sr)	mg.kg-1	0,05	131,00	98,00	107,00	84,50
Zinc (Zn)	mg.kg-1	0,05	23,00	84,00	45,00	8,00

III. METODOLOGÍA DE ENSAYO

ENSAYO	NORMA DE REFERENCIA
Metas en suelo por ICP-MS (Arsénico, Berilio, Cadmio, Calcio, Cobalto, Cobre, Estroncio, Molibdeno, Niquel, Plata, Plomo, Selenio, Talio, Vanadio)	Metas MP-AES 4210 / Mexicana NOM-117-SSA1-1994/EPA 8010C/MET-UCC/RT/Res-22 SENASA

IV. CONSIDERACIONES

- Estado en las que ingreso la Muestras: Buenas Condiciones de almacenamiento
- Este informe no puede ser reproducido total, ni parcialmente sin la autorización de LABSAF y del cliente.
- Los resultados se relacionan solamente con los ítems sometidos a ensayo
- Los resultados se aplican a las muestras, tales como se recibieron
- Este documento es válido sólo para el producto mencionado anteriormente.
- El Laboratorio no es responsable cuando la información proporcionada por el cliente pueda afectar la validez de los resultados.
- Medición de pH realizada a 25 °C.
- Medición de Conductividad Eléctrica realizada a 25 °C.



Red de Laboratorios de Suelos, Aguas y Foliares
Acreditado con la Norma
NTP-ISO/IEC 17025:2017
LABSAF (Nombre)
Dirección: (Dirección del laboratorio)
Email: (correo de contacto del laboratorio)

F-46 / Ver.05
www.inia.gob.pe