

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL



**REMOCIÓN INDIVIDUAL Y CONJUNTA DE Pb, Cd y Zn EN MEDIO ACUOSO
UTILIZANDO EL *Chrysopogon zizanioides* (VETIVER)**

Tesis

Para optar el título de:

INGENIERO AMBIENTAL

PRESENTADO POR:

TATIANA YEN POMAHUALI SEVILLANO

Tingo María – Perú

2024



ACTA DE SUSTENTACION DE TESIS N° 02-2025-FRNR-UNAS

Los que suscriben, Miembros del Jurado de Tesis, reunidos con fecha 12 de diciembre de 2024, a horas 9:00 a.m. de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Recursos Naturales Renovables para calificar la tesis titulada:

“REMOCIÓN INDIVIDUAL Y CONJUNTA DE Pb, Cd y Zn EN MEDIO ACUOSO UTILIZANDO EL *Chrysopogon zizanioides* (VETIVER)”

Presentado por la Bachiller: **TATIANA YEN POMAHUALI SEVILLANO**, después de haber escuchado la sustentación y las respuestas a las interrogantes formuladas por el Jurado, se declara **APROBADO** con el calificativo de “**MUY BUENA**”.

En consecuencia, el sustentante queda apto para optar el Título Profesional de **INGENIERO AMBIENTAL** que será aprobado por el Consejo de Facultad, Tramitándolo al Consejo Universitario para el otorgamiento del Título Correspondiente.

Tingo María, 03 de enero de 2025


Dr. CESAR SAMUEL LOPEZ LOPEZ
PRESIDENTE


Ing. MSc. ERLE OTTO J. BUSTAMANTE SCAGLIONI
MIEMBRO


Ing. M. Sc. ALBERTO FRANCO CERNA CUEVA
MIEMBRO




Dr. JOSÉ LUIS PAREDES SALAZAR
ASESOR



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
DIRECCIÓN DE GESTIÓN DE INVESTIGACIÓN - DGI
REPOSITORIO INSTITUCIONAL - UNAS

Correo: repositorio@unas.edu.pe



"Año de la recuperación y consolidación de la economía peruana"

CERTIFICADO DE SIMILITUD T.I. N° 209 - 2025 - CS-RIDUNAS

El Director de la Dirección de Gestión de Investigación de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, quien suscribe,

CERTIFICA QUE:

El Trabajo de Investigación; aprobó el proceso de revisión a través del software TURNITIN, evidenciándose en el informe de originalidad un índice de similitud no mayor del 25% (Art. 3° - Resolución N° 466-2019-CU-R-UNAS).

Programa de Estudio:

Ingeniería Ambiental

Tipo de documento:


Tesis

X

Trabajo de Suficiencia Profesional

TÍTULO	AUTOR	PORCENTAJE DE SIMILITUD
REMOCIÓN INDIVIDUAL Y CONJUNTA DE Pb, Cd y Zn EN MEDIO ACUOSO UTILIZANDO EL <i>Chrysopogon zizanioides</i> (VETIVER)	TATIANA YEN POMAHUALI SEVILLANO	11 % Once

Tingo María, 01 de julio de 2025


UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
UNIDAD DE GESTIÓN DE LA INVESTIGACIÓN
Dr. Tomás Mejacho Mallqui
JEFE

C.C. Archivo

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL



REMOCIÓN INDIVIDUAL Y CONJUNTA DE Pb, Cd y Zn EN MEDIO ACUOSO UTILIZANDO EL *Chrysopogon zizanioides* (VETIVER)

Autor	: Pomahuali Sevillano Tatiana Yen
Asesor	: Ing. MSc. Jose Luis Paredes Salazar
Área de investigación	: Ciencia y Tecnología Ambiental - PIBIOT
Grupo de investigación	: Ciencia y Tecnología Ambiental
Línea de investigación	: Tecnologías para reducir la contaminación
Lugar de ejecución	: Tingo María
Duración del trabajo	: 25 de noviembre 2024 12 de diciembre 2024
Financiamiento	: Propio
Presupuesto	: S/. 6 878,1

DEDICATORIA

A Dios, por iluminar mi camino en cada en cada paso de esta aventura. Su fuerza y sabiduría me han brindado la determinación para superar los desafíos y alcanzar esta meta.

A mis padres: Walter y Armandina, por su apoyo constante y su confianza puesta en mí. Este logro es un testimonio del valor de sus enseñanzas.

A mis queridas hermanas: Mariel y Mayte, por ser mi fuente de alegría y fortaleza. Su apoyo y comprensión han hecho que esto sea más llevadero y significativo.

A mis queridas mascotas: Masha, Oso, Jisoo y Filo, por su leal compañía y su capacidad única de brindar alegría en los días más duros.

Les dedico a cada uno de ustedes por ser parte fundamental de mi vida.

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que han sido fundamentales para que esto fuera posible.

Primero y ante todo a mi familia por su constante apoyo y aliento durante mi vida profesional.

A mi asesor el Ing. M Sc. José Luis Paredes Salazar, por su guía experta y paciencia. Su apoyo académico y profesional han sido cruciales para el desarrollo y culminación de esta investigación.

A los miembros de jurado de mi tesis por sus exhaustivas revisiones y sugerencias que han sido fundamentales para mejorar la calidad de esta investigación.

A los encargados y practicantes del Laboratorio de Calidad del agua y Laboratorio de suelos, por brindarme su tiempo y experiencia para la ejecución de mi proyecto.

ÍNDICE

	Página
I. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Objetivo general.....	2
1.1.1. Objetivos específicos.....	2
II. REVISIÓN DE LITERATURA	3
2.1. Marco teórico.....	3
2.1.1. Aguas residuales.....	3
2.1.2. Metales pesados.....	3
2.1.3. El <i>C. zizanioides</i>	7
2.1.4. Fitorremediación de metales pesados	8
2.1.5. Límites Máximos Permisibles (LMP)	10
2.1.6. Nitrato de potasio (KNO ₃).....	10
2.2. Estado del arte.....	11
III. MATERIALES Y MÉTODOS	14
3.1. Lugar de ejecución.....	14
3.1.1. Ubicación política.....	14
3.1.2. Ubicación geográfica.....	14
3.2. Aspectos sociales y ambientales	14
3.2.1. Clima	14
3.2.2. Zona de vida	14
3.3. Materiales y equipos.....	15
3.3.1. Materiales	15
3.3.2. Equipos	15
3.3.3. Reactivos	15
3.3.4. Programas.....	15
3.4. Criterios de investigación	15

3.4.1.	Variables de estudio.....	15
3.4.2.	Tipo de investigación.....	15
3.4.3.	Diseño de investigación.....	16
3.5.	Metodología.....	17
3.5.1.	Acondicionamiento de los esquejes de <i>C. zizanioides</i> para su aplicación en los tratamientos de la investigación.....	17
3.5.2.	Determinación de la eficiencia de remoción individual de Pb, Cd y Zn en medio acuoso utilizando el <i>C. zizanioides</i>	17
3.5.3.	Determinación de la eficiencia de remoción conjunta de Pb, Cd y Zn en medio acuoso utilizando el <i>C. zizanioides</i>	19
3.5.4.	Determinación de las diferencias estadísticas entre la eficiencia de remoción individual y conjunta de Pb, Cd y Zn en medio acuoso utilizando el <i>C. zizanioides</i>	19
3.6.	Análisis estadístico	19
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	20
4.1.	Acondicionamiento de los esquejes de <i>C. zizanioides</i>	20
4.2.	Eficiencia de remoción individual de Pb, Cd y Zn en medio acuoso utilizando el <i>C. zizanioides</i>	21
4.3.	Eficiencia de remoción conjunta de Pb, Cd y Zn en medio acuoso utilizando el <i>C. zizanioides</i>	23
4.4.	Diferencias estadísticas entre la eficiencia de remoción individual y conjunta de Pb, Cd y Zn en medio acuoso utilizando el <i>C. zizanioides</i>	26
V.	CONCLUSIÓN	28
VI.	PROPUESTAS A FUTURO	29
VII.	REFERENCIAS	30

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Página
1. Presencia de metales pesados en alimentos producidos en Perú.....	6
2. Presencia de metales pesados en suelo, agua y sedimento del Perú.	7
3. Clasificación taxonómica.....	7
4. Eficiencia de remoción de metales pesados en medio acuoso con <i>C. zizanioides</i>	9
5. Límites máximos permisibles para descarga de efluentes líquidos de actividades minero-metalúrgicas.....	10
6. Ubicación geográfica del lugar.	14
7. Tratamientos de estudio.	16
8. Diferencias estadísticas de eficiencias de remoción individual de Pb, Cd y Zn en medio acuoso, con y sin <i>C. zizanioides</i>	22
9. Diferencias estadísticas de eficiencias de remoción conjunta de Pb, Cd y Zn en medio acuoso, con y sin <i>C. zizanioides</i>	24
10. Diferencias estadísticas de la eficiencia de remoción individual y conjunta de Pb, Cd y Zn en medio acuoso utilizando el <i>C. zizanioides</i>	26
11. . Longitud final de los brotes y raíces de los esquejes de <i>C. zizanioides</i>	41
12. Indicadores evaluados de la investigación.	46
13. Eficiencia de remoción individual de Pb, después de 10 días de tratamiento.....	46
14. Eficiencia de remoción individual del Cd, después de 10 días de tratamiento.	46
15. Eficiencia de remoción individual de Zn, después de 10 días de tratamiento.	46
16. Eficiencia de remoción conjunta de Pb, Cd y Zn, después de 10 días de tratamiento.	47

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. Diseño de investigación.....	16
2. Crecimiento en longitud de brotes y raíces de los esquejes de <i>C. zizanioides</i> después de 20 días.....	20
3. Eficiencia de remoción individual de Pb, Cd y Zn en medio acuoso, con y sin <i>C. zizanioides</i>	21
4. Eficiencia de remoción individual de Pb, Cd y Zn en medio acuoso, con y sin <i>C. zizanioides</i>	23
5. Eficiencia de remoción individual y conjunta de Pb, Cd y Zn en medio acuoso, utilizando el <i>C. zizanioides</i>	26
6. Diseño de los sistemas para el acondicionamiento.	42
7. Diseño del armazon del techo.	42
8. Diseño de los sistemas tipo batch.....	43
9. Diseño de los sistemas con y sin <i>C. zizanioides</i>	43
10. Instalación del techo.....	48
11. Instalación de los sistemas para el acondicionamiento del <i>C. zizanioides</i>	48
12. Crecimiento del <i>C. zizanioides</i> después de 20 días de acondicionamiento.....	49
13. Pesaje del Pb (NO ₃) ₂	49
14. Preparación de los compuestos.....	50
15. Adición de los compuestos en cada sistema.....	50
16. Sistemas después de 10 días de tratamiento.....	51
17. <i>C. zizanioides</i> después de 10 días de tratamiento.	51
18. Ubicación del Laboratorio de Calidad de Agua de la Universidad Nacional Agraria de la Selva.....	52
19. Resultados de la concentración final del medio acuoso de Pb, Cd y Zn.	53

RESUMEN

La contaminación del agua por metales pesados como el Pb, Cd y Zn constituyen una amenaza al ambiente, seguridad alimentaria y la salud, debido a su toxicidad y su tendencia a bioacumularse a lo largo de la cadena alimentaria. Esta investigación tuvo como objetivo comparar la eficiencia de remoción individual y conjunta de estos metales en medio acuoso utilizando el *C. zizanioides*. Los esquejes se acondicionaron durante 20 días en una solución de KNO_3 , y posteriormente se instalaron doce y seis cubas con y sin *C. zizanioides*, respectivamente. Se adicionaron soluciones con 15 ppm de Pb, Cd y Zn en sistemas individuales y 5 ppm de cada metal en sistemas conjuntos, luego se determinaron las eficiencias de remoción en ambos sistemas y las diferencias estadísticas. Los resultados mostraron que, en condiciones individuales, las eficiencias de remoción en medio acuoso utilizando el *C. zizanioides*, presentaron el orden: $\text{Pb} > \text{Cd} > \text{Zn}$, destacando su afinidad preferencial por estos metales en ausencia de competencia. En condiciones conjuntas, las eficiencias de remoción cambiaron al orden: $\text{Zn} > \text{Cd} > \text{Pb}$, indicando que la competencia entre los metales por los sitios de absorción influye en el comportamiento del sistema. Las diferencias estadísticas entre las eficiencias de remoción individual y conjunta confirmaron la influencia de las interacciones competitivas entre los metales en la capacidad fitorremediadora de la planta. Concluyendo así que el *C. zizanioides* es una alternativa eficaz para la remediación de aguas contaminadas con Pb, Cd y Zn adaptándose a condiciones individuales como conjuntos.

Palabras claves: Vetiver, eficiencia de remoción, agua contaminada, metales pesados, fitorremediación.

ABSTRACT

Water contamination due to heavy metals such as Pb, Cd and Zn causes a threat to the environment, food security and health, due to the toxicity and the tendency for bioaccumulation throughout the food chain. The objective of this research was to compare the individual and joint removal efficiency of these metals in an aqueous medium using *C. zizanioides*. The cuttings were conditioned during twenty days in a solution of KNO₃, and later twelve and six cubes with and without *C. zizanioides*, respectively, were installed. Solutions with 15 ppm of Pb, Cd and Zn were added in individual systems and 5 ppm of each metal in joint systems; later the removal efficiencies and the statistical differences were determined for both systems. The results revealed that, for the individual conditions, the removal efficiencies in an aqueous medium using *C. zizanioides*, presented the order of: Pb > Cd > Zn; highlighting the preferential affinity for the heavy metals in absence of competition. For the joint conditions, the removal efficiencies changed order: Zn > Cd > Pb; indicating that the competition between the metals for the absorption sites influenced the behavior of the system. The statistical differences between the individual and joint removal efficiencies confirmed the influence of the competitive interactions between the metals for the phytoremediation capacity of the plant. Thus, it was concluded that *C. zizanioides* was an effective alternative for the remediation of water contaminated with Pb, Cd and Zn, adapting to individual as well as joint conditions.

Keywords: vetiver, removal efficiency, contaminated water, heavy metals, phytoremediation.

I. INTRODUCCIÓN

La contaminación de las fuentes hídricas por metales pesados como el Pb, Cd y Zn, constituye una creciente amenaza para los ecosistemas, la seguridad alimentaria y la salud pública. Estos elementos, altamente tóxicos y no biodegradables, tienden a bioacumularse en la cadena trófica, incrementando el riesgo de afecciones graves, como daños a órganos vitales, alteraciones en el desarrollo neurológico, problemas renales y cáncer. Además, su presencia en el agua, también genera un impacto acumulativo en la calidad de los recursos hídricos, limitando su aprovechamiento para actividades esenciales.

En el Perú, el problema se agrava debido al manejo inadecuado de las aguas residuales, que contienen altas concentraciones de metales pesados que terminan vertiéndose en los diferentes cuerpos de agua, afectando tanto la calidad como la disponibilidad del recurso hídrico para actividades agrícolas, consumo humano y otros usos. Además, estudios recientes han evidenciado la bioacumulación de metales pesados en cultivos de cereales, hortalizas, peces destinados al consumo y productos lácteos en los Andes centrales, que superan los límites permitidos para consumo humano.

Ante esta situación, es crucial desarrollar estrategias sostenibles para la remediación de cuerpos de agua contaminados. Entre las alternativas existentes, la fitorremediación mediado por *Chrysopogon zizanioides* destaca como una alternativa prometedora por ser accesible, económica y ambientalmente amigable, debido a su adaptabilidad a condiciones hidropónicas, resistencia a plagas y enfermedades, rápido crecimiento y bajo riesgo de transferencia a la cadena alimentaria puesto que no son comestibles. Además, esta especie ofrece beneficios adicionales, como su utilización en la producción de aceites esenciales, biocombustible y productos de limpieza; minimizando el impacto ambiental secundario y generando un valor económico agregado.

Asimismo, en condiciones ambientales reales, los metales pesados rara vez se encuentran de manera aislada, lo que genera la necesidad de evaluar la capacidad de remoción del *C. zizanioides* frente a mezclas de metales. Este enfoque permite analizar posibles efectos sinérgicos o antagónicos que influyen en la eficiencia de remoción de los contaminantes, proporcionando una visión más realista y aplicable al tratamiento de aguas contaminadas.

En este sentido, el presente trabajo de investigación tiene como objetivo comparar la eficiencia de remoción de Pb, Cd y Zn individual y conjunta en medio acuoso utilizando el *C. zizanioides*. Este análisis busca contribuir al desarrollo de estrategias de integrales y sostenibles que se adapten a las condiciones ambientales reales.

Por lo indicado en párrafos anteriores, surge la siguiente interrogante: ¿Cómo varía la eficiencia de remoción de Pb, Cd y Zn de manera individual frente a su remoción conjunta en medio acuoso utilizando el *C. zizanioides*? Asimismo, se plantea como hipótesis que, la eficiencia de remoción de Pb, Cd y Zn en medio acuoso utilizando el *C. zizanioides*, varía significativamente entre ambas condiciones, siendo mayor para el Pb y Cd en sistemas individuales, mientras que para el Zn alcanzará su máximo en sistemas conjuntos.

1.1. Objetivo general

Comparar la eficiencia de remoción individual y conjunta de Pb, Cd y Zn en medio acuoso utilizando el *C. zizanioides*.

1.1.1. Objetivos específicos

- Acondicionar los esquejes de *C. zizanioides* para su aplicación en los tratamientos de la investigación.
- Determinar la eficiencia de remoción individual de Pb, Cd y Zn en medio acuoso utilizando el *C. zizanioides*.
- Determinar la eficiencia de remoción conjunta del Pb, Cd y Zn en medio acuoso utilizando el *C. zizanioides*.
- Determinar las diferencias estadísticas entre la eficiencia de remoción individual y conjunta de Pb, Cd y Zn en medio acuoso utilizando el *C. zizanioides*.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Marco teórico

2.1.1. Aguas residuales

Según el Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental [OEFA], (2014), son aquellas aguas utilizadas en actividades humanas y debido a estas actividades, se alteran las características originales del agua, por lo que antes de ser reusada o vertidas a un cuerpo de agua requieren de un tratamiento previo.

2.1.2. Metales pesados

Son elementos cuya densidad es igual o mayor a 5g/cm^3 y se clasifican en esenciales y tóxicos (Tatis y Martínez, 2019).

- Metales esenciales

Son aquellos metales que en pequeñas concentraciones son necesarios para el organismo como el Mn, B, Cu, Zn y otros (Heredia, 2021).

- Metales tóxicos

Son perjudiciales en pequeñas concentraciones debido a que no presentan una función biológica, como el Cd, Hg, Cr, Pb y otros (Heredia, 2021).

2.1.2.1. Pb

El Pb es un metal pesado altamente nocivo, cuyo número atómico es 82 (Kumar et al., 2020).

- Fuentes de contaminación

Las fuentes de Pb por procesos naturales son la meteorización de minerales, erosión del suelo, erupciones volcánicas y emisiones marinas (Pinto et al., 2019), por actividades humanas el uso de agroquímicos, quema de combustibles fósiles, pintura, fundición, refinería, minería, cosméticos y baterías (Lee et al., 2019).

- **Toxicidad del Pb**

El Pb provoca una serie de síntomas de toxicidad, el cual depende del tiempo de exposición y dosis (Charkiewicz y Backstrand, 2020; Nwaehiri et al., 2020). Se acumula en la sangre, huesos y órganos como el hígado, riñones, cerebro y piel, causando daños agudos a crónicos como fatiga, trastornos de fertilidad, dolores de cabeza, encefalopatía e incluso la muerte (Charkiewicz y Backstrand, 2020).

La toxicidad del Pb en las plantas se manifiesta con la producción alterada de clorofila a, división celular comprometida, elongación inhibida de las raíces, organización laminar alterada en los cloroplastos, crecimiento deficiente de las plantas, un retraso en el desarrollo de las plántulas, una transpiración reducida (Afzal, et al 2024) y una reducción del 42% en el crecimiento de las raíces (Collin et al., 2022).

2.1.2.2. Cd

- **Fuentes de contaminación**

Según Mahmood et al. (2019), las fuentes de Cd por procesos naturales son los incendios forestales y las erupciones volcánicas en la tierra y en las profundidades del mar; y por actividades antropogénicas, la minería, fundición, descarga de aguas residuales industriales y partículas en suspensión en el aire.

- **Toxicidad del Cd**

En los animales, el Cd no se degrada metabólicamente y llega a acumularse en los riñones durante 10 a 30 años (Genchi et al., 2020; Mazzocco et al., 2020), causando problemas en el pulmón, hígado, sistema urinario, reproductivo y cardiovascular (Amegah et al., 2021; Genchi et al., 2020).

En las plantas, las altas concentraciones de Cd ejercen efectos tóxicos sobre sus procesos fisiológicos y metabólicos, como la disminución en la longitud de las hojas y el peso fresco, la germinación de las semillas, el contenido de clorofila, la conductancia estomática, inhibe la fotosíntesis y causa degradación mitocondrial, lo que provoca enrojecimiento de las venas, necrosis, clorosis, retarda el crecimiento de raíces y brotes y disminuye la absorción de nutrientes (Mahmood et al., 2019).

2.1.2.3. Zn

El Zn cuyo número atómico es 30 y en altas concentraciones altera la homeostasis del organismo (Sousa et al. 2020).

- Fuentes de contaminación

Las fuentes naturales de Zn son la erosión de las rocas, incendios forestales y erupciones volcánicas; y las fuentes antropogénicas son el uso de fertilizantes fosfatados en la agricultura y las actividades mineras y de fundición, producción de acero y descarga de aguas residuales ((Kaur y Garg, 2021).

- Toxicidad del Zn

En los humanos, el exceso de Zn puede provocar el síndrome fiebre de los humos, riesgo mayor de cáncer de próstata, incremento de colesterol, anemia (Goswami et al., 2023), diarrea, falta de apetito, vómitos, náuseas y dolores de cabeza (Rahman, 2019).

En las plantas, el Zn en bajas concentraciones es un micronutriente, pero en exceso altera la homeostasis (Sousa et al. 2020), provocando daño oxidativo al potenciar los niveles de radicales reactivos, deficiencia de otros nutrientes esenciales debido a radios iónicos similares (Bankaji et al., 2019), altera la fotosíntesis, la transpiración y varios otros procesos fisiológicos esenciales (Shahid et al., 2022), disminución en el crecimiento de las plantas, la integridad estructural e induce clorosis foliar (Chakraborty y Mishra, 2020), deterioro de proteínas, lípidos, ARN y ADN (Bernardy et al., 2020; Sidhu et al., 2020), disminución de carotenoides, clorofila a y b (Kafil et al., 2019).

El Zn es uno de los metales pesados más biodisponibles y transportables, por lo que el exceso de este elemento induce a la síntesis de especies reactivas de oxígeno, provocando estrés oxidativo y alteraciones en la homeostasis de otros elementos (Kaur et al., 2024).

2.1.2.4. Movilidad y biodisponibilidad del Pb, Cd y Zn en las plantas

Las concentraciones de Pb, Cd y Zn se distribuyen principalmente hacia las raíces, retenido en la pared celular y espacios intercelulares (Zhao et al 2023), y solo una fracción se transporta a otras partes de la planta (Kubier, et al 2019) mediante el ascenso de la savia (Dong et al., 2019).

Asimismo, la biodisponibilidad de los metales pesados está relacionada con su forma química (Miranda et al., 2020) y en específico, la biodisponibilidad del Pb está influenciada por diferentes interacciones químicas, factores ambientales y su absorción esta mediada por los canales de Ca, los ácidos orgánicos y la vía de las fitoquelatinas que participan en el transporte, movilidad y desintoxicación de metales, respectivamente (Liu et al., 2023).

Sin embargo, la coexistencia de múltiples metales pesados podría conducir a la transformación de sus formas químicas en un solo metal pesado (Zhao et al., 2021) o en el caso del Zn afectar la absorción de otros metales (Shahid et al., 2022), como el Cd, el cual es inhibido por el Zn debido a que ambos metales son transportados por un transportador común en la membrana plasmática de la raíz (Norini et al., 2019).

2.1.2.5. Metales pesados en el Perú

Algunos estudios encontraron la presencia de metales pesados en alimentos producidos (Tabla 1), en suelo, agua y sedimento del Perú (Tabla 2).

Tabla 1. Presencia de metales pesados en alimentos producidos en Perú.

Ciudad	Medio de contaminación	Contaminantes	Autor
Puerto Maldonado	<i>Manihot esculenta</i> y <i>Musa paradisiaca</i>	As, Cd, Pb y Hg	Benavente et al. (2020)
Junín	Leche cruda de vaca	Pb, Cd y As	Brediñaña et al. (2023)
Huacaybamba	<i>Chenopodium quinoa</i>	As, Cu, Zn, Pb, Cd	Huamani et al. (2023)
Paccha, Huancayo y Mantaro	Leche cruda de vaca	Pb y Cd	Peinado et al. (2024)
Arequipa	<i>Mentha sativa</i> , <i>Mentha spicata</i> y <i>Allium sativum</i>	As, Cd, Cr, As y Hg	Quispe et al. (2021)

Fuente: Benavente et al. (2020); Brediñaña et al. (2023), Huamani et al. (2023), Peinado et al. (2024), Quispe et al. (2021)

Tabla 2. Presencia de metales pesados en suelo, agua y sedimento del Perú.

Ciudad	Medio de contaminación	Contaminantes	Autor
Huancavelica	Sedimento de los ríos Opamayo y Sicra	Ar, Cd, Pb y Cr	Armas et al. (2020)
Apurímac	Rio Huancaray	Zn, Cr, Cu, Pb, Ni y As	Cuba et al. (2020)
Puno	Rio Crucero	Cd, Zn y As	Mercado et al. (2020)
Tiquillapa	Suelo	As, Cd y Pb	Ochoa et al. (2022)
Puno	Sedimento superficial del rio Coata	Cr, Cd y Pb	Yana et al. (2019)

Fuente: Armas et al. (2020); Cuba et al. (2020); Mercado et al. (2020); Ochoa et al. (2022); Yana et al. (2019).

2.1.3. El *C. zizanioides*

Pandey et al. (2020), indican la siguiente clasificación taxonómica para el *C. zizanioides*:

Tabla 3. Clasificación taxonómica.

Categorías taxonómicas	Taxón
Reino	Plantae
División	Magnoliophyta
Clase	Liliopsida
Orden	Poales
Familia	Poaceae
Género	Chrysopogon
Especie	<i>Chrysopogon zizanioides</i>

Fuente: Pandey et al. (2020).

Es una planta perenne, no invasiva, resistente a plagas, enfermedades y al fuego (Tito, 2021), presenta largos nudos y entrenudos, alcanzando una altura de hasta 2 m (Pandey et al., 2020).

La capacidad de la biomasa de los brotes de vetiver para servir como cobertura del suelo y simultáneamente suministrar nutrientes minerales está relacionada con la cantidad de biomasa producida, su tasa de descomposición y la liberación de estos nutrientes en el suelo o cultivo (Lakshmi y Sekhar 2020).

2.1.4. Fitorremediación de metales pesados

La fitorremediación es una estrategia rentable y respetuosa con el medio ambiente (Kumar et al., 2020), que utiliza plantas vivas para eliminar o reducir los contaminantes de un medio (Rigoletto et al., 2020) y aporta un valor recreativo y estético al paisaje, al permitir la expresión vegetal en cuerpos de agua y suelos contaminados (Yan et al., 2020).

La eficiencia de esta técnica mejora cuando la planta produce mayores cantidades de biomasa (Dorafshan et al., 2023), es capaz de adaptarse a diferentes medios y exhibe respuestas biomoleculares para resistir la alta concentración de metales pesados y evitar el estrés (Yaashikaa et al., 2022).

Las plantas aromáticas como el *C. zizanioides* son fuentes potenciales para la fitorremediación a largo plazo, debido a que no son comestibles y no pueden infiltrarse a la cadena alimentaria; por el contrario, la biomasa al finalizar el tratamiento puede usarse para la producción de biogás, energía, aceites esenciales para jabones, repelentes y detergentes (Mishra y Chandra, 2022).

2.1.4.1. El *C. zizanioides* y metales pesados

La capacidad del *C. zizanioides* para remediar metales tóxicos surge de su rápido crecimiento en diferentes medios y su alta tolerancia ambiental (Banerjee et al. 2019). Otros autores mencionan que, mediante la secreción de ácidos orgánicos, fenoles, glutatión y S transferasa sintetizan fitoquelatinas en las raíces (Kiiskilaa, et al 2020) y apoyado por el anti portador de tonoplastos, forman el complejo metal quelante, uniendo los metales para convertirse en biomasa vegetal, permitiendo la absorción de metales y su translocación a los tejidos más jóvenes, por lo que se presenta una dilución debido al aumento de biomasa (Nugroho et al., 2021).

Asimismo, el *C. zizanioides* presenta raíces largas y profundas que se extienden hacia el suelo y/o agua como una pared natural viva, permitiendo el desarrollo de biopelículas, intercambio gaseoso, oxidación de fitotoxinas, degradación aeróbica, absorción y acumulación de metales (Kriti, et al 2021), por ello su eficiencia de remoción dependerá de la longitud de las raíces y la densidad de la planta (Banerjee et al. 2019; Kubier et al., 2019). El aumento de biomasa y radicular del *C. zizanioides* permite mayor eficiencia de remoción de contaminantes (Durand y García, 2022 y Carmona y Orellana, 2022).

Según Li et al (2024), señalan que el *C zizanioides* tiene la capacidad de resistir y adaptarse lo largo de sus etapas de crecimiento, bajo el estrés por metales, transformando los esteroides libres (incluidos campesterol y estigmasterol) de las raíces, en conjugados (no extraíbles) para mejorar la fase líquida ordenada de la membrana plasmática y sintetizar mayor cantidad de brasinoesteroides (hormona vegetal endógena), para desintoxicar el metal intracelular al promover la síntesis de fitoquelatinas en las raíces de la planta.

A continuación, se muestran siete investigaciones organizadas según el contaminante (Cd, Zn, Cu, Ni, Pb, As y Cr) individual o conjunto, tiempo de tratamiento y eficiencia de remoción en medio acuoso con la especie vegetal *C zizanioides* (Tabla 4).

Tabla 4. Eficiencia de remoción de metales pesados en medio acuoso con *C zizanioides*.

Origen	Contaminante	Tiempo de tratamiento	Eficiencia de Remoción	Autor
Agua residual de fábrica de cartón	Pb y Cd (conjunto)	40 días	Pb: 90,63 % y Cd: 80,95 %	Davamani et al. (2021)
Agua artificial	Pb y As (conjunto)	15 días	Pb: 100 % y As: 99,1 %	Goykovic et al. (2021)
Agua de río	Pb	4 meses	Pb: 99,72 %	Herrera y Sumba (2019)
Drenaje ácido de mina	Zn, Cu y Ni (conjunto)	30 días	Zn:98,36 %, Cu: 97,38 % y Ni: 97,7 %	Nguegang et al. (2022)

Agua artificial	Cr y Ni (individual)	28 días	Cr: 61,10 % y Ni: 95,65 %	Nugroho et al. (2021)
Agua de riego de un canal	Zn y Cu (conjunto)	45 días	Zn. 95 %, Cu: 95 %	Tito (2021)
Agua artificial	Cd	124 días	> 90 %	Wu et al. (2022)

Fuente: Davamani et al. (2021); Goykovic et al. (2021); Herrera y Sumba (2019); Nguengang et al. (2022); Nugroho et al. (2021); Tito (2021); Wu et al. (2022).

2.1.5. Límites Máximos Permisibles (LMP)

Los límites máximos permisibles (LMP) para descarga de efluentes líquidos de actividades minero-metalúrgicas, respecto al Pb, Cd y Zn según el D.S N° 010-2010-MINAM, se detalla en la Tabla 5.

Tabla 5. Límites máximos permisibles para descarga de efluentes líquidos de actividades minero-metalúrgicas

Parámetro	Unidad	Limite
Pb	mg/L	0,20
Cd	mg/L	0,05
Zn	mg/L	1,5

Fuente: D.S N° 010-2010-MINAM.

2.1.6. Nitrato de potasio (KNO₃)

El KNO₃ es una fuente importante de N y K en forma iónica (Mghaiouini et al., 2021). En medio acuoso permite su disponibilidad y absorción (Anwar et al., 2020), contribuye al intercambio gaseoso (CO₂ y O₂), aumenta el contenido relativo de clorofila y la tasa fotosintética; mejorando la absorción y el transporte de agua y sales minerales mediante los pelos absorbentes de las raíces hasta los estomas para transformarse en savia elaborada, proporcionando los nutrientes necesarios a las plantas (Ávila et al., 2020) y por consecuente aumenta la longitud, biomasa aérea y radicular de las plantas (Rodrigues, et al., 2021 y Silva, et al., 2019). Asimismo, el K actúa como agente mitigante del estrés (Aksu y Alta, 2020), por ello la aplicación KNO₃ mejora el rendimiento fisiológico en condiciones de estrés (Ávila et al., 2020).

2.2. Estado del arte

Zhao et al. (2023), en China investigaron los efectos ecotóxicológicos del Cd, Pb, Zn y Hg individual y combinado en el suelo, y los mecanismos de regulación del *Solanum Nigrum L.* Obtuvieron como resultado que la contaminación combinada de metales pesados ejerció una mayor toxicidad debido a su mayor biodisponibilidad en el orden $Zn > Cd > Pb$, acumulándose principalmente en la pared celular, vacuolas y fracciones solubles de las raíces, por ello se requiere de gran cantidad de biomasa para acumular altas concentración de metales.

Nguegang et al. (2022), en Sudáfrica aplicaron un sistema nano y biótico integrado sinérgicamente de forma modular y gradual para el tratamiento de drenaje de ácido de minas, conformada por neutralización con nano partículas de MgO y tres humedales con *C. zizanioides* con flujo vertical subterráneo, flujo superficial y flujo horizontal subterráneo. Obtuvieron como resultado una remoción de Fe (99,8 %), Al (99,5 %), Mn (99,24 %), Zn (98,36 %), Cu (97, 38 %) y Ni (97,7 %), cuya eliminación puede atribuirse principalmente a diferentes procesos biológicos como sedimentación, transformación química, filtración, asimilación biológica, fitoacumulación, evaporación o volatilización.

Wu et al. (2022), en China aplicaron un sistema combinado de ácido húmico y *C. zizanioides* para tratar aguas contaminadas con Cd. Para ello, adaptaron los esquejes durante una semana con KNO_3 y colocaron un aireador en cada sistema y una película de plástico transparente para evitar la evaporación excesiva del agua y/o metal. Obtuvieron como resultado que después de 62 días de absorción biológica del *C. zizanioides* y la adición de 150 mg/L de ácido húmico, una remoción $> 75 \%$ y después de 124 días $> 90 \%$ y la distribución subcelular del Cd en las raíces siguió la tendencia: pared celular $>$ orgánulo $>$ citoplasma.

Davamani et al. (2021), en India evaluaron la capacidad fitorremediadora del *C. zizanioides* de efluentes de una fábrica de cartón. Para ello los esquejes se cortaron a 15 cm y se adaptaron con agua de grifo durante 1 semana. Posteriormente se adicionó el efluente de la fábrica de cartón y se instaló el sistema hidropónico flotante, después de 40 días de tratamiento obtuvieron una remoción de Pb y Cd de 90,63 % y 80,95 %, respectivamente, por ello el *C. zizanioides* presenta una mayor afinidad por el Pb. Concluyendo que esta especie debido a su capacidad reproductiva y su sistema de raíces es una alternativa eficaz y económica para la fitorremediación.

Goykovic et al. (2021), en Chile evaluaron la capacidad fitorremediadora del *C. zizanioides* en aguas contaminadas con As y Pb de forma conjunta. Para ello, colocaron una planta por estanque, para aclimatarlas durante 30 días en agua potable y añadieron 1ml de ácido húmico. Posteriormente, añadieron 10 ppm de Pb y 5 ppm de As a sus tratamientos, los cuales constaron de agua contaminada con y sin *C. zizanioides*. Después de un periodo de 15 días, la concentración del As y Pb en el testigo (sin vetiver), disminuyó en 0,4 % (de 5 a 4,98 ppm) y 0,2 % (de 10 a 9,98 ppm), respectivamente. Con el *C. zizanioides* el As disminuyó en 99,1 % y el Pb en 100, llegando a acumularse el 24,1 % de As y el 4,5 % de Pb en las hojas. Concluyendo que esta especie presenta una capacidad fitoestabilizadora y acumuladora, permitiendo la reducción de la movilidad de los metales, la lixiviación a aguas subterráneas y su entrada a la cadena alimenticia.

Tito (2021), en Perú aplicó la fitorremediación con la especie *C. zizanioides* para tratar el agua de riego de un canal. Para ello, adaptó los esquejes en una solución con estiércol, luego sumergió los esquejes en el agua de riego del canal durante 45 días de tratamiento. Obtuvo una remoción del 95 % de Zn, 95 % de Cu y 97 % de Be. Concluyendo que la aplicación del *C. zizanioides* mejora la calidad del agua de riego del canal.

Nugroho et al. (2021), en Indonesia evaluaron la tasa de absorción y eliminación de metales pesados por el *C. zizanioides* en aguas residuales de galvanoplastia artificial. Para ello, al inicio del tratamiento agregaron fertilizantes (6,20 g NPK y 2,06 g de urea diluidos en 100 ml de agua) y lixiviados de compost (5 g) y después de 28 días el *C. zizanioides* mediante el anti portador de tonoplastos, forman el complejo metal quelante, uniendo los metales para convertirse en biomasa vegetal, permitiendo la absorción de metales y su translocación a los tejidos más jóvenes, por lo que se presenta una dilución debido al aumento de biomasa. Logrando eliminar el 61,10 % de Cr y el 95,65 % de Ni y sus tasas de absorción y eliminación del Cr fueron 127,21 mg/kg/día y 1,09 mg/kg/día y del Ni 15,60 mg/kg/día y 12,24 mg/kg/día, respectivamente. Concluyendo que esta especie es un potencial fitorremediador que actúa mediante la fitoextracción y fitoestabilización.

Herrera y Sumba (2019), en Ecuador evaluaron la remoción del Pb en medio acuoso procedente de un río, mediado por el *C. zizanioides*. Para ello diseñaron islas flotantes con aireación y un sustrato de fibra de coco; luego los esquejes se adaptaron con KNO₃ durante 101 días. Posteriormente, los esquejes se sumergieron en el agua de río y después de 4 meses de tratamiento obtuvieron una remoción de 99,72 %.

Kafil et al. (2019), en Irán evaluaron el efecto del riego de aguas residuales industriales y municipales sobre el crecimiento y los pigmentos vegetales del *C. zizanioides* sembrado en suelo contaminado con metales pesados. Para ello, aplicaron cuatro tratamientos, T1: aguas residuales industriales tratadas, T2: relación 1:1 de aguas residuales municipales e industriales, T3: aguas residuales municipales tratadas y T4: agua de grifo; en plantaciones con y sin esquejes, con adición de hongos micorrízicos arbusculares (HMA). Obtuvieron el mayor incremento de peso seco de brotes y raíces en los esquejes con adición de HMA y regados con el T3, en el T1 sin adición de HMA obtuvieron una mayor disminución de carotenoides, clorofila a y b, y en todos los tratamientos con *C. zizanioides* disminuyó significativamente las concentraciones de Zn, Fe, Cu, Cd y Pb en el suelo en comparación con los tratamientos sin esquejes. Concluyendo que El *C. zizanioides* acumula metales en las raíces más que en los brotes, lo que demuestra que podría usarse en la fitoestabilización del Pb, Cd y Zn.

Norini et al. (2019), en Francia estudiaron el comportamiento del Ba, Pb, Cd, As y Zn en el suelo de una mina aplicando biocarbón y plantaciones de sauce y raigrás. Obtuvieron como resultado que el biocarbón permite el desarrollo de raíces, aumento de biomasa de las especies que estudiaron. La influencia de las plantas sobre el comportamiento de los metales fue perceptible con el Zn y Cd, debido a que el Zn es fácilmente asimilado por las plantas que el Cd, por lo que la fitoacumulación de Cd disminuye en presencia de Zn. Concluyendo que la adición de una enmienda y el cultivo de sauces y raigrás modifica el comportamiento de los metales que estudiaron.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Lugar de ejecución

3.1.1. Ubicación política

El presente estudio se realizó en el laboratorio de calidad del agua de la especialidad de Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, políticamente ubicado en el distrito de Rupa Rupa, provincia de Leoncio Prado y región Huánuco (Ver Anexo E, Figura 18).

3.1.2. Ubicación geográfica

La ubicación del laboratorio de calidad del agua según las coordenadas UTM se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6. Ubicación geográfica del lugar.

Lugar	Coordenadas Este (m)	Coordenadas Norte (m)	Altitud (m.s.n.m.)
Laboratorio de calidad del agua	390698	8970228	670

3.2. Aspectos sociales y ambientales

3.2.1. Clima

La ciudad de Tingo María presenta en promedio una humedad relativa de 82,9 % y una temperatura media de 23,8 °C, con valores máximos de 30,9 °C y mínimas de 18,6 °C, además de una precipitación anual de 3 454,6 mm (Servicio Nacional de Meteorología e hidrología [SENAMHI], 2023).

3.2.2. Zona de vida

Según la clasificación de zonas de vidas o formaciones vegetales propuesto por Holdrige (1982), Tingo María se sitúa en bosque muy húmedo pre montano tropical (Bmh-PT), también denominado como región natural Rupa Rupa o Selva Alta.

3.3. Materiales y equipos

3.3.1. Materiales

Dieciocho cubas de vidrio, dos mesas de madera, veinte esquejes de *C. zizanioides*, tubo de PVC de 1", madera habilitada de 1" x 1", clavos de 1/2", plástico transparente de 4 m x 3 m, martillo, espátula de laboratorio, mascarilla y guantes.

3.3.2. Equipos

Balanza analítica Marca Sartorius (grado de exactitud de 0.0001g), Espectrofotómetro UV-Visible Marca Oriom, Espectrofotómetro de Absorción Atómica, estufa, centrífuga.

3.3.3. Reactivos

Pb (NO₃)₂, CdSO₄·⁸/₃ H₂O y ZnSO₄·7 H₂O, KNO₃, H₂SO₄ concentrado, Na₂SO₄, CHCl₃, KMnO₄, K₂S₂O₈, ClH₄NO y KBr.

3.3.4. Programas

Para el proceso de datos, se empleó programas como Microsoft Office (PowerPoint, Word y Excel), Arc Gis 10,8, Google Earth Pro y SPSS 27.

3.4. Criterios de investigación

3.4.1. Variables de estudio

- Variable independiente : Pb, Cd y Zn (individual y conjunta)
- Variable dependiente : Eficiencia de remoción utilizando el *C. zizanioides*
- Variables intervinientes : Factores ambientales (Humedad, Temperatura y cantidad de luz solar)

3.4.2. Tipo de investigación

Aplicada, puesto que se aplicaron conocimientos obtenidos con anterioridad con el objeto de dar solución a un problema inmediato, para provecho de la sociedad (Zuñiga et al., 2023).

3.4.3. Diseño de investigación

Experimental, porque se pretendió conocer el efecto de una causa que se manipula (variable independiente) y conocer los efectos sobre la variable dependiente (Galarza, 2021). Así que, la investigación constó de cuatro tratamientos (T1, T2, T3 y T4) y cuatro testigos (To1, To2, To3 y To4), como se muestra en la Tabla 7 y Figura 1.

Tabla 7. Tratamientos de estudio.

Tratamiento	Formulación	Repeticiones
T ₁	<i>C. zizanioides</i> + 15 ppm de Pb en medio acuoso	R1, R2 y R3
T ₂	<i>C. zizanioides</i> + 15 ppm de Cd en medio acuoso	R1, R2 y R3
T ₃	<i>C. zizanioides</i> + 15 ppm de Zn en medio acuoso	R1, R2 y R3
T ₄	<i>C. zizanioides</i> + 5 ppm de Pb + 5 ppm de Cd + 5 ppm de Zn en medio acuoso	R1, R2 y R3 (por cada metal)
To ₁	15 ppm de Pb en medio acuoso	R1, R2
To ₂	15 ppm de Cd en medio acuoso	R1, R2
To ₃	15 ppm de Zn en medio acuoso	R1
To ₄	5 ppm de Pb + 5 ppm de Cd + 5 ppm de Zn en medio acuoso	R1 (por cada metal)

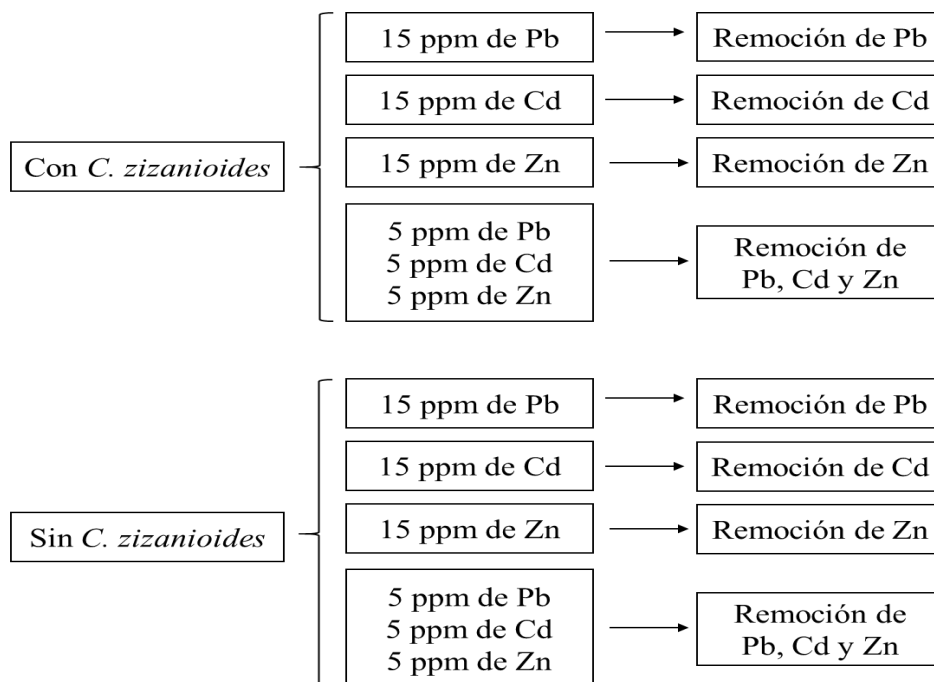


Figura 1. Diseño de investigación.

3.5. Metodología

3.5.1. Acondicionamiento de los esquejes de *C. zizanioides* para su aplicación en los tratamientos de la investigación

Se diseñó e instaló un almacén cubierto con plástico transparente para proteger las condiciones ambientales necesarias para el desarrollo del experimento. Dentro de esta estructura, se dispusieron doce cubas de vidrio, seleccionadas como contenedores para los tratamientos. Luego, mediante un muestreo aleatorio se seleccionaron doce esquejes de *C. zizanioides*, las cuales se recortaron a una altura de 10 cm desde la base del tallo, garantizando uniformidad en las muestras. Cada esqueje fue colocado en una cuba, utilizando tubos de PVC de 15 cm como flotadores, y se agregó a cada recipiente 5 L de una solución preparada con 150 ppm de KNO_3 como base nutritiva para fomentar el desarrollo inicial de los esquejes. Después de 20 días, se midieron las longitudes de las raíces y tallos para verificar el crecimiento y garantizar que las plantas estuvieran aptas para su aplicación en los tratamientos experimentales.

3.5.2. Determinación de la eficiencia de remoción individual de Pb, Cd y Zn en medio acuoso utilizando el *C. zizanioides*

a) Diseño e instalación de los sistemas

En base a los antecedentes se diseñaron sistemas tipo lote y se construyeron e instalaron dieciocho cubas de vidrio con dimensiones de 30 cm de altura, 25 cm de ancho y 15 cm de largo.

b) Adición de la concentración de metales

Basándose en los LMP para descarga de efluentes líquidos de actividades minero-metalúrgicas según el D.S N° 010-2010-MINAM, se prepararon soluciones que excedieron estos niveles de concentración. A cada cuba se le agregaron 5 L de una solución con una concentración de 15 ppm de Pb, Cd y Zn, según correspondía.

- **Masa del Pb, Cd y Zn:** Para adicionar los metales, se utilizaron los compuestos $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$, $\text{CdSO}_4 \cdot \frac{8}{3} \text{H}_2\text{O}$ y $\text{ZnSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$. La masa requerida para cada compuesto se calculó en tres etapas: primero, se calculó la masa del metal necesaria para alcanzar una concentración de 15 ppm mediante la Ecuación 1; luego se calculó la masa del compuesto con la Ecuación 2; y finalmente, se obtuvo la masa final de la solución con la Ecuación 3 (ver Anexo C).

$$m = C_{metal} * V \dots \dots \dots (1)$$

Donde:

C_{metal} : Concentración del metal (mg/L)

m : Masa del metal (mg)

V : Volumen de la solución (L)

$$m_{compuesto} = \frac{m * \bar{M}_{compuesto}}{\bar{M}_{metal}} \dots \dots \dots (2)$$

Donde:

$m_{compuesto}$: Masa del compuesto (mg)

m : Masa del metal (mg)

\bar{M} : Peso molecular (g/mol)

$$m_f = \frac{m_{compuesto} * 100 \%}{P} \dots \dots \dots (3)$$

Donde:

m_f : Masa final del compuesto (mg)

$m_{compuesto}$: Masa del compuesto (mg)

P : Pureza del compuesto (%)

c) Instalación del *C. zizanioides* en los sistemas

Los esquejes previamente acondicionados se instalaron en los sistemas, a razón de un esqueje por cuba de vidrio. Estos se mantuvieron en contacto directo con las soluciones metálicas descritas anteriormente, durante un tiempo de retención de 10 días.

d) Determinación de la concentración final de Pb, Cd y Zn

La concentración final de Pb, Cd y Zn se llevó a cabo por espectrofotometría de absorción atómica. Para ello, se homogenizó cada muestra y se tomó una alícuota de 50 ml, que se transfirió a un vaso de precipitación para su digestión. Se añadieron 3 ml de ácido nítrico concentrado y se calentó en una placa, seguido de 5 ml adicionales del mismo ácido nítrico, cubriendo con un vidrio de reloj y calentándose hasta observar reflujo de vapores. Cuando la muestra mostró una apariencia cristalina constante, se dejó enfriar. Luego, se agregaron 10 ml de ácido clorhídrico (1:1) y 15 ml de agua por cada 100 ml de solución final, y se calentó durante 15 min. Finalmente, la solución se llevó al volumen de aforo, se dejó enfriar y se filtró para su posterior análisis en el Laboratorio de Suelos (Márquez, 2009).

e) Determinación de la eficiencia de remoción

Para determinar la eficiencia de remoción se aplicó la Ecuación 4:

$$\text{Eficiencia de remoción (\%)} = \frac{C_i - C_f}{C_i} * 100 \dots \dots \dots (4)$$

Donde:

Ci: Concentración inicial

Cf: Concentración final

3.5.3. Determinación de la eficiencia de remoción conjunta de Pb, Cd y Zn en medio acuoso utilizando el *C. zizanioides*

La eficiencia de remoción conjunta se determinó siguiendo el procedimiento descrito anteriormente, con la diferencia de que la concentración de los metales fue de 5 ppm para cada uno (Pb, Cd y Zn) en cada cuba de vidrio.

3.5.4. Determinación de las diferencias estadísticas entre la eficiencia de remoción individual y conjunta de Pb, Cd y Zn en medio acuoso utilizando el *C. zizanioides*

Para determinar las diferencias estadísticas se aplicó la prueba t para muestras independientes, donde los grupos a comparar fueron las eficiencias de remoción de Pb, Cd y Zn individuales frente a la eficiencia de remoción en conjunto.

3.6. Análisis estadístico

Se verificó si existían diferencias significativas entre las concentraciones finales de los metales individuales y en conjunto en la remoción utilizando el *C. zizanioides* frente a los testigos (sin *C. zizanioides*). Para ello, se utilizó la prueba t para muestras independientes cuando el testigo contaba con más de una repetición, mientras que para los testigos con una sola repetición se aplicó la prueba t para una sola muestra. Además, para el contraste de la hipótesis se empleó la prueba t para muestras independientes, comparando las eficiencias de remoción de Pb, Cd y Zn individuales frente a la eficiencia de remoción en conjunto utilizando el *C. zizanioides*.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Acondicionamiento de los esquejes de *C. zizanioides*

Después de 20 días, se observó el crecimiento de brotes y raíces en los esquejes evaluados. El esqueje 2 presentó las mejores características de desarrollo, alcanzando una altura de brote de 30,2 y longitud de raíz de 18,7 cm (Figura 2).

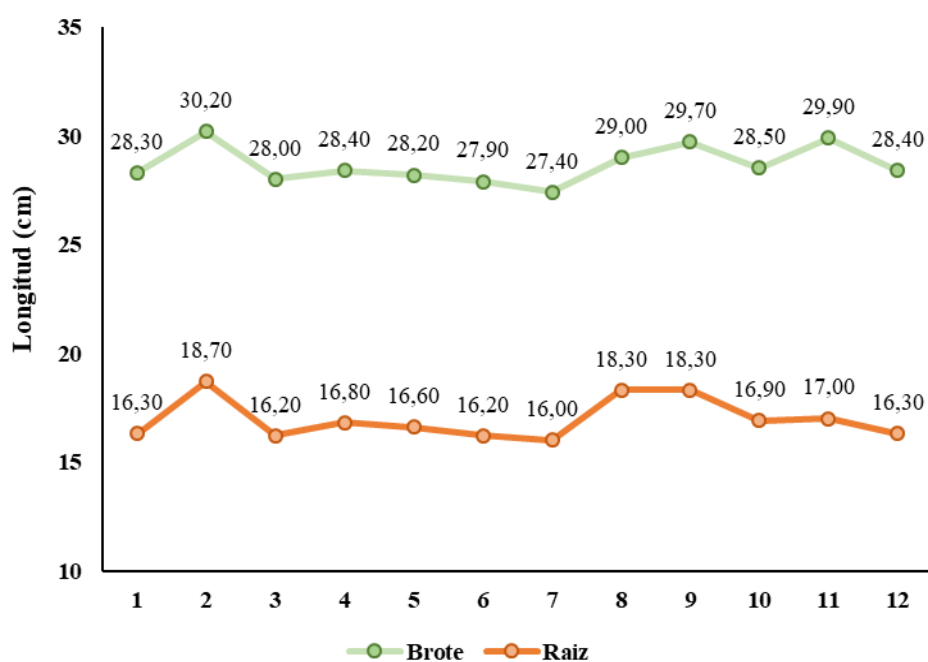


Figura 2. Crecimiento en longitud de brotes y raíces de los esquejes de *C. zizanioides* después de 20 días.

El acondicionamiento de los esquejes de *C. zizanioides* durante 20 días con una dosis única de KNO_3 se desarrolló favorablemente. Este compuesto constituye una fuente de Nitrógeno (N) y potasio (K) en forma iónica (Mghaiouini et al., 2021) y en un medio acuoso, su disponibilidad y absorción resultan óptimas (Anwar et al., 2020), facilitando el intercambio gaseoso (CO_2 y O_2), aumento del contenido relativo de clorofila y la tasa fotosintética. Además, el KNO_3 mejora la absorción y transporte de agua y sales minerales desde las raíces hacia las estomas para la síntesis de savia elaborada, proporcionando los nutrientes necesarios para el desarrollo de las plantas (Ávila et al., 2020), y por consiguiente aumenta la longitud, biomasa aérea y radicular (Rodrigues et al., 2021 y Silva et al., 2019); por ello las raíces y tallos de los esquejes mostraron un crecimiento significativo, reflejando un adecuado acondicionamiento.

Además, los brotes de *C. zizanioides* mostraron un color verde y ausencia de signos de estrés, lo que evidencia una adecuada concentración de N y K. Esto coincide con Sawyer et al. (2019) quienes asocian la deficiencia de N con clorosis, y con Aksu y Altay (2020), quienes señalan que el K actúa como agente mitigante del estrés. Asimismo, el aumento de biomasa radicular de los esquejes mejora la capacidad de remoción de contaminantes (Durand y García, 2022 y Carmona y Orellana, 2022). Finalmente, la aplicación de KNO_3 no solo mejora el rendimiento fisiológico en condiciones de estrés (Ávila et al., 2020) sino que también prepara a los esquejes para su adaptación y crecimiento en medios acuosos contaminados con Pb, Cd y Zn (Goykovic et al., 2021).

4.2. Eficiencia de remoción individual de Pb, Cd y Zn en medio acuoso utilizando el *C. zizanioides*

La mayor eficiencia de remoción individual de Pb, Cd y Zn en medio acuoso, después de 10 días de tratamiento, se obtuvo al utilizar el *C. zizanioides*. Entre los tres metales, la especie mostró la mayor eficiencia en la remoción del Pb, alcanzando un 99,88 %, seguido por el Cd con un 99,64 % y, finalmente el Zn con un 90,62 % (Figura 3).

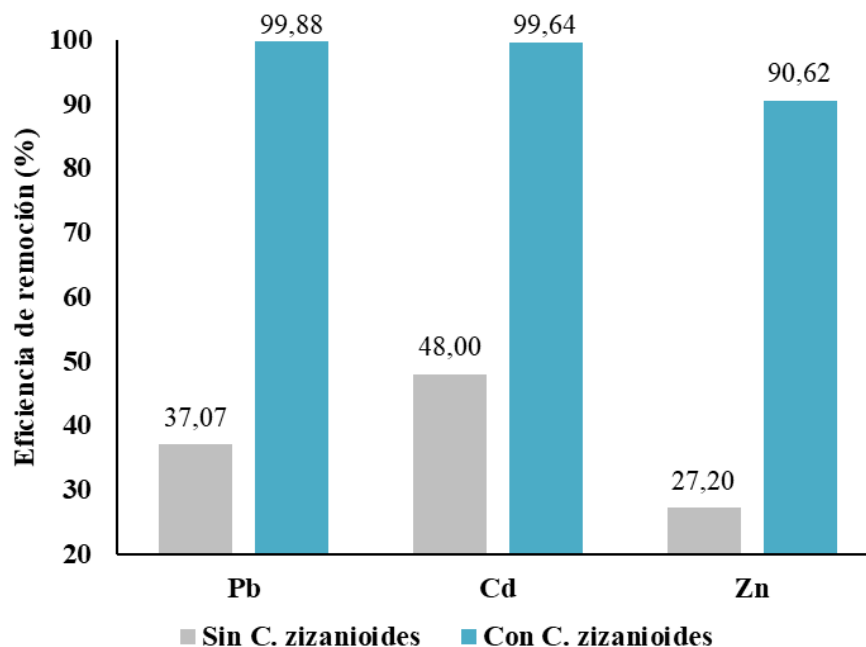


Figura 3. Eficiencia de remoción individual de Pb, Cd y Zn en medio acuoso, con y sin *C. zizanioides*.

En la Tabla 8 se muestra que los valores de significancia obtenidos fueron menores a 0,05 en todos los casos, lo que indica que la remoción de Pb, Cd y Zn fue significativamente más eficiente al utilizar el *C. zizanioides*.

Tabla 8. Diferencias estadísticas de eficiencias de remoción individual de Pb, Cd y Zn en medio acuoso, con y sin *C. zizanioides*.

Metal	t	Significancia	Decisión
Pb	-58,87	0,01	Significativa
Cd	-38,78	0,02	Significativa
Zn	43,94	<0,01	Significativa

t: Estadístico.

La remoción de Pb, Cd y Zn de manera individual en sistemas sin *C. zizanioides* puede atribuirse a procesos físicoquímicos como la sedimentación, evaporación, fotodegradación y volatilización (Nguegang et al., 2022). Estos mecanismos pueden explicar la disminución de las concentraciones en ausencia del *C. zizanioides*, reflejando una contribución limitada de procesos no biológicos en la remoción de contaminantes en estos sistemas.

En contraste, los sistemas con *C. zizanioides* mostraron eficiencias significativamente superiores, confirmando la capacidad fitorremediadora de esta especie. Los resultados indican que las eficiencias de remoción presentan el orden: Pb > Cd > Zn. Estos resultados coinciden con Herrera y Sumba (2019), quienes evaluaron la remoción del Pb en agua del río Cutuchi utilizando islas flotantes con *C. zizanioides*, alcanzando una eficiencia de remoción de 99,72 % después de un periodo de 4 meses. De manera similar, Tito (2021) reportó una eficiencia del 95 % (de 4.52 ppm a 0.218 ppm) en la remoción de Zn durante 45 días, utilizando agua de un canal de riego. Además, Wu et al. (2022), evaluaron la capacidad de remoción de Cd utilizando *C. zizanioides*, obteniendo una eficiencia de remoción superior al 75 % después de 62 días y superando el 90 % tras 124 días, atribuyendo su alta capacidad a la acumulación subcelular del metal en la pared celular, orgánulos y citoplasma de las raíces.

Por otro lado, aunque el Zn es esencial para el metabolismo de las plantas, en concentraciones elevadas se presentan síntomas de toxicidad, como la disminución de carotenoides, clorofila a y b (Kafil et al., 2019), inhibe la división celular, elongación radicular y el crecimiento general (Afzal et al., 2024). Por su parte, el Cd provoca disminución en la longitud de las hojas, el peso fresco, el contenido de clorofila, la conductancia estomática, inhibe la fotosíntesis y causa degradación mitocondrial, lo que provoca enrojecimiento de tallos, necrosis, clorosis, retarda el crecimiento y disminuye la absorción de nutrientes (Mahmood et al., 2019).

Sin embargo, durante los 10 días de tratamiento, los esquejes de *C. zizanioides* no evidenciaron signos visibles de toxicidad; probablemente debido al acondicionamiento previo con KNO_3 . Esto coincide con lo señalado por Zhao et al. (2023), quienes destacaron que se requiere una gran cantidad de biomasa para acumular altas concentración de metales pesados, minimizando los efectos tóxicos inmediatos. Además, Hassan et al. (2022) resaltan que el Zn, en cantidades adecuadas, mejora la síntesis de pigmentos fotosintéticos y mejora el crecimiento bajo estrés por metales pesados.

Cabe destacar que la diferencia en la eficiencia de remoción entre metales puede atribuirse a factores como la afinidad química del metal por los tejidos vegetales, las propiedades fisicoquímicas del metal en la solución y las características fisiológicas de la planta, puesto que el Pb tiende a ser más fácilmente adsorbido por las raíces debido a su mayor reactividad con las paredes celulares, mientras que el Zn, al ser un micronutriente esencial, puede estar sujeto a mecanismos reguladores de absorción.

4.3. Eficiencia de remoción conjunta de Pb, Cd y Zn en medio acuoso utilizando el *C. zizanioides*

La mayor eficiencia de remoción conjunta de Pb, Cd y Zn en medio acuoso, se obtuvo al utilizar el *C. zizanioides*. Entre los tres metales, la especie mostró la mayor eficiencia en la remoción del Zn, seguida por el Cd y, finalmente el Pb (Figura 4).

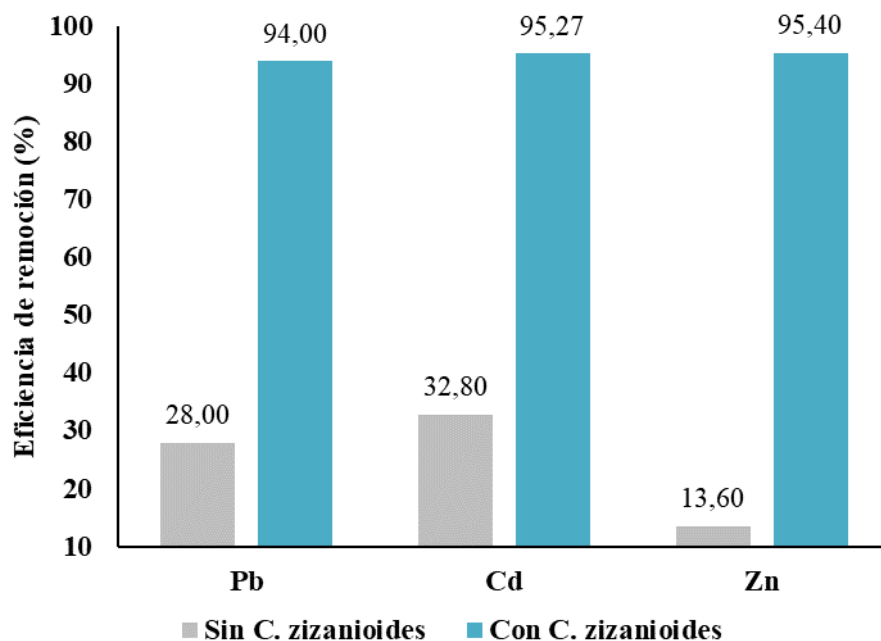


Figura 4. Eficiencia de remoción individual de Pb, Cd y Zn en medio acuoso, con y sin *C. zizanioides*.

En la Tabla 9 se muestra que los valores de significancia obtenidos fueron menores a 0,05 en todos los casos, lo que indica que la remoción de Pb, Cd y Zn fue significativamente más eficiente al utilizar el *C. zizanioides*.

Tabla 9. Diferencias estadísticas de eficiencias de remoción conjunta de Pb, Cd y Zn en medio acuoso, con y sin *C. zizanioides*.

Metal	t	Significancia	Decisión
Pb	62,36	<0,01	Significativa
Cd	119,97	<0,01	Significativa
Zn	118,07	<0,01	Significativa

t: Estadístico.

Los sistemas con *C. zizanioides* demostraron eficiencias significativamente superiores en la remoción de Pb, Cd y Zn, resaltando la capacidad fitorremediadora de la especie, que actúa mediante procesos combinados de fitoacumulación, adsorción y translocación de metales pesados hacia los tejidos de la planta (Wu et al., 2022).

La alta eficiencia del *C. zizanioides* puede atribuirse a sus características fisiológicas y bioquímicas, como su extenso sistema radicular que facilitan la adsorción, acumulación y estabilización de metales (Kriti et al., 2021; Kubier et al., 2019). Según Zhao et al. (2023), los metales pesados como el Pb, Cd y Zn tienden a acumularse principalmente en las raíces, donde son retenidos en la pared celular y los espacios intercelulares, reduciendo su movilidad hacia otras partes de la planta. Este mecanismo también contribuye a la fitoestabilización, evitando la lixiviación de los metales hacia aguas subterráneas y limitando su incorporación a la cadena alimentaria (Goykavic et al., 2021). Esto evidencia que el *C. zizanioides* es una alternativa prometedora para la fitoestabilización de metales pesados en soluciones acuosas.

La mayor eficiencia en la remoción conjunta del Zn (95,40 %) podría explicarse por su alta biodisponibilidad en comparación con el Pb y el Cd. Según Zhao et al. (2023) indican que, bajo exposición conjunta a múltiples metales pesados, la biodisponibilidad sigue el orden $Zn > Cd > Pb$, debido a las propiedades químicas y los mecanismos de transporte celular. Además, Norini et al. (2019) señalan que el Zn puede inhibir la absorción de Cd debido a la competencia por transportadores comunes en la membrana plasmática de las raíces, lo que resulta en una mayor acumulación de Zn en las plantas. Este mecanismo, combinado con la

mayor asimilación de Zn, contribuye a una menor fitoacumulación del Cd y Pb en presencia del Zn. Estas interacciones resaltan la importancia de considerar propiedades químicas y las interacciones sinérgicas entre metales en estudios de remediación ambiental (Liu et al., 2023). En general, la biodisponibilidad de los metales está influenciado por factores ambientales e interacciones químicas, que pueden generar toxicidad sinérgica al competir por sitios de unión, alterar su absorción e inhibir los mecanismos metabólicos de desintoxicación (Arreguin et al., 2024; Jeong et al., 2023; Liu et al., 2023).

En línea con Davamani et al. (2021) y Tito (2021), se ha demostrado que el *C. zizanioides* es una alternativa eficaz y económica para la fitorremediación, debido a su capacidad reproductiva, resistencia y sistema radicular desarrollado. Además, la planta puede secretar ácidos orgánicos, fenoles y glutatión, que facilitan la formación de fito quelatinas, y complejos metal quelantes en las raíces (Kiiskilaa et al., 2020). Estos mecanismos permiten la acumulación de metales en las raíces, su translocación a los tejidos más jóvenes y, en última instancia, su conversión en biomasa vegetal (Nugroho et al., 2021).

Estudios como el de Hui et al. (2024) mencionan que, bajo estrés por metales el, *C. zizanioides* transforma esteroides libres en conjugados no extraíbles y sintetiza brasinoesteroides, fortaleciendo la membrana plasmática y promoviendo la desintoxicación intracelular de metales. Estos procesos, junto con el transporte mediado por canales de Ca y las rutas de fito quelatinas, respaldan la capacidad de adaptación y eficiencia de esta especie en la remoción de contaminantes (Liu et al., 2023).

Finalmente, los resultados obtenidos coinciden parcialmente con Goykovic et al. (2021), demostraron que el *C. zizanioides* puede remover hasta el 99,1 % de As y el 100 % de Pb, en un periodo de 15 días, llegando a acumularse el 24,1 % de As y el 4,5 % de Pb en las hojas, por lo que esta planta presenta una capacidad fitoestabilizadora y acumuladora. De manera similar, Davamani et al. (2021), encontraron que *C. zizanioides* alcanzó una remoción del 90,63 % para el Pb y del 80,95 % para el Cd en efluentes industriales, destacando su afinidad por el Pb. Sin embargo, en este estudio, en presencia de los tres metales de manera conjunta, la remoción del Cd fue ligeramente superior a la del Pb, lo cual podría atribuirse a interacciones químicas entre los metales que alteran su biodisponibilidad, las condiciones ambientales y las concentraciones iniciales de los metales. Según Arreguin et al. (2024), este enfoque integrado permite optimizar el uso de plantas como *C. zizanioides* en escenarios reales, donde las mezclas de contaminantes reflejan las condiciones de ambientes afectados por actividades antrópicas.

4.4. Diferencias estadísticas entre la eficiencia de remoción individual y conjunta de Pb, Cd y Zn en medio acuoso utilizando el *C. zizanioides*

La eficiencia de remoción Pb y el Cd fue significativamente mayor de manera individual, alcanzando 99,88 % y 99,64 %, respectivamente. Mientras, para el Zn, la mayor eficiencia se observó en la presencia de los tres metales en conjunto, con un 95,40 % (Figura 5 y Tabla 10).

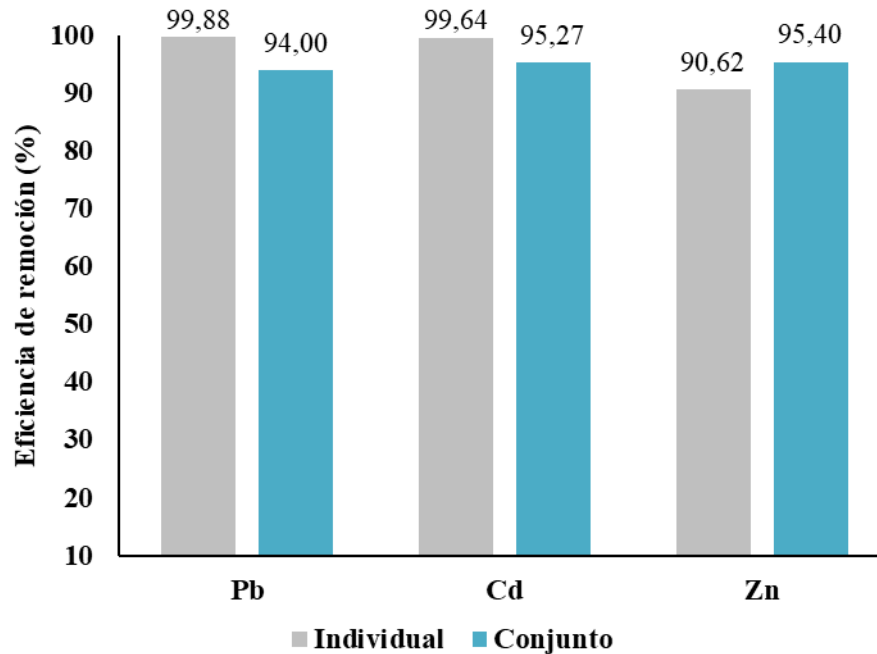


Figura 5. Eficiencia de remoción individual y conjunta de Pb, Cd y Zn en medio acuoso, utilizando el *C. zizanioides*.

Tabla 10. Diferencias estadísticas de la eficiencia de remoción individual y conjunta de Pb, Cd y Zn en medio acuoso utilizando el *C. zizanioides*.

Metal	t	Significancia	Decisión
Pb	5,55	0,03	Significativa
Cd	8,33	<0,01	Significativa
Zn	-2,99	0,04	Significativa

t: Estadístico.

El *C. zizanioides* mostró diferencias significativas en la eficiencia de remoción de Pb, Cd y Zn al comparar los sistemas de tratamiento individual y conjunto, reflejando la influencia de las interacciones entre los metales en su capacidad fitorremediadora. En sistemas

individuales, el orden de remoción fue $Pb > Cd > Zn$, con eficiencias máximas de 99,88 % y 99,64 % para el Pb y el Cd, respectivamente; lo que evidencia su alta afinidad por estos metales en ausencia de competencia. La preferencia por el Pb puede atribuirse a su baja movilidad en la planta y fuerte adsorción en las paredes celulares de las raíces (Kubier et al., 2019; Zhao et al., 2023), mientras que la remoción efectiva del Cd, reafirma su capacidad para estabilizar este metal tóxico, como lo indican estudios que destacan su acumulación preferente en las raíces (Kriti et al., 2021).

En sistemas conjuntos, se observó un cambio en el orden de remoción, siendo $Zn > Cd > Pb$, con una eficiencia máxima para el Zn de 95,40 %. Este comportamiento podría explicarse por la mayor biodisponibilidad del Zn en soluciones acuosas, que favorece su absorción frente al Pb y el Cd (Zhao et al., 2023). Además, las interacciones competitivas entre metales limitan la remoción del Pb y el Cd, lo que no concuerda con Davamani et al. (2021), quienes evaluaron la capacidad fitorremediadora del *C. zizanioides* de efluentes de una fábrica de cartón y obtuvieron una remoción de Pb y Cd de 90,63 % y 80,95 %, respectivamente, por ello el *C. zizanioides* presenta una mayor afinidad por el Pb. Este fenómeno resalta la importancia de los transportadores metálicos en las raíces, donde el Zn puede inhibir parcialmente la absorción de otros metales en condiciones conjuntas (Norini et al., 2019).

A pesar de la disminución en la eficiencia en condiciones conjuntas, el *C. zizanioides* sigue siendo efectivo para reducir significativamente las concentraciones de contaminantes en comparación con los sistemas sin la especie, reforzando su potencial como una solución sostenible y económica para la remediación de ambientes impactados por actividades humanas.

V. CONCLUSIÓN

1. Se logró acondicionar favorablemente los esquejes de *C. zizanioides*, evidenciado por el aumento en la altura de los brotes y la longitud de las raíces, asegurando su viabilidad para los tratamientos de la investigación.
2. En condiciones individuales, las eficiencias de remoción en medio acuoso utilizando el *C. zizanioides*, presentaron el orden: $Pb > Cd > Zn$, destacando su afinidad preferencial por estos metales en ausencia de competencia.
3. En condiciones conjuntas, las eficiencias de remoción, en medio acuoso utilizando el *C. zizanioides*, cambiaron al orden: $Zn > Cd > Pb$, indicando que la competencia entre los metales por los sitios de absorción influye en el comportamiento del sistema.
4. Se determinó diferencias estadísticas significativas entre las eficiencias de remoción individual y conjunta, reflejando la influencia de las interacciones competitivas entre los metales en la capacidad fitorremediadora del *C. zizanioides*.

VI. PROPUESTAS A FUTURO

1. Realizar investigaciones futuras en la remoción de metales pesados en diferentes etapas de crecimiento del *C. zizanioides*.
2. Considerar en investigaciones futuras la aplicación de más esquejes de *C. zizanioides* por sistema y mayores tiempos de retención.
3. Considerar en investigaciones futuras el análisis de otros metales en conjunto con los parámetros fisicoquímicos.
4. Considerar en investigaciones futuras el análisis del factor de translocación y factor de concentración biológico.

VII. REFERENCIAS

- Afzal, S., Alghanem, S. M. S., Alsudays, I. M., Malik, Z., Abbasi, G. H., Ali, A., Noreen, S., Ali, M., Irfan, M. y Rizwan, M. (2024). Effect of biochar, zeolite and bentonite on physiological and biochemical parameters and lead and zinc uptake by maize (*Zea mays* L.) plants grown in contaminated soil. *Journal Of Hazardous Materials*, 469, 133927. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.133927>
- Aksu, G. y Altay, H. (2020). The Effects of Potassium Applications on Drought Stress in Sugar Beet. *Sugar Tech*, 22(6), 1092-1102. <https://doi.org/10.1007/s12355-020-00851-w>
- Amegah, A. K., Sewor, C. y Jaakkola, J. J. K. (2021). Cadmium exposure and risk of adverse pregnancy and birth outcomes: a systematic review and dose–response meta-analysis of cohort and cohort-based case–control studies. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*, 31(2), 299-317. <https://doi.org/10.1038/s41370-021-00289-6>
- Anwar, A., Yu, X. y Li, Y. (2020). Seed priming as a promising technique to improve growth, chlorophyll, photosynthesis and nutrient contents in cucumber seedlings. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 48(1), 116-127. <https://doi.org/10.15835/nbha48111806>
- Armas, L. Q., Acharte, L. M., Enríquez, A. y Asto, J. M. (2021). CONTAMINACIÓN CON METALES PESADOS EN SEDIMENTOS y TRUCHAS EN LOS RÍOS OPAMAYO y SICRA, HUANCAVELICA-PERÚ. *Revista de Investigación Científica Siglo XXI*, 1(1), 68-78. <https://doi.org/10.54943/rcsxxi.v1i1.12>
- Arreguin, U. R., Gebara, R. C., Valencia, G. C., Rico, R. M., Frías, M. G. E., Longo, E. y Páez, F. O. (2024). Toxicity of binary-metal mixtures (As, Cd, Cu, Fe, Hg, Pb and Zn) in the euryhaline rotifer *Proales similis*: Antagonistic and synergistic effects. *Marine Pollution Bulletin*, 198, 115819. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115819>
- Ávila, R. G., Magalhães, P. C., Da Silva, E. M., De Alvarenga, A. A., Reis, C. O. D., Custódio, A. M., Jakelaitis, A. y De Souza, T. C. (2021). Foliar application of potassium nitrate

induces tolerance to water deficit in pre-flowering sorghum plants. *Acta Scientiarum. Agronomy*, 44, e53069. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v44i1.53069>

- Banerjee, R., Goswami, P., Lavania, S., Mukherjee, A. y Lavania, U. C. (2019). Vetiver grass is a potential candidate for phytoremediation of iron ore mine spoil dumps. *Ecological Engineering*, 120-136. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.10.012>
- Bankaji, I., Pérez-Clemente, R., Caçador, I. y Sleimi, N. (2019). Accumulation potential of *Atriplex halimus* to zinc and lead combined with NaCl: Effects on physiological parameters and antioxidant enzymes activities. *South African Journal Of Botany*, 123, 51-61. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2019.02.011>
- Bernardy, K., Farias, J. G., Pereira, A. S., Dorneles, A. o. S., Bernardy, D., Tabaldi, L. A., Neves, V. M., Dressler, V. L. y Nicoloso, F. T. (2020). Plants' genetic variation approach applied to zinc contamination: secondary metabolites and enzymes of the antioxidant system in *Pfaffia glomerata* accessions. *Chemosphere*, 253, 126692. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126692>
- Bedriñana, J. A., Peinado, D. Ch., Ríos, E. R., Chirinos, G. C., Rodríguez, P. Ch. y De la Cruz, G. C. (2023). Lead, Cadmium, and Arsenic in Raw Cow's Milk in a Central Andean Area and Risks for the Peruvian Populations. *Toxics*, 11(10), 809. <https://doi.org/10.3390/toxics11100809>
- Benavente, M. S., Achata, L. R., Olivera, M., Arostegui, V., Colina, C. y Garate, J. (2020). Health risks due to the presence of heavy metals in agricultural products cultivated in areas abandoned by gold mining in the Peruvian Amazon. *Scientia Agropecuaria*, 11(1), 49-59. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2020.01.06>
- Carmona, M. A. L. y Orellana, N. C. (2022). *Influencia del sistema vetiver en la descontaminación de aguas residuales en la laguna de oxidación de Yaurilla, Los Aquijes, 2022* [Tesis de título, Universidad César Vallejo]. Repositorio institucional. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/88921>
- Chakraborty, S. y Mishra, A. K. (2020). Mitigation of zinc toxicity through differential strategies in two species of the cyanobacterium *Anabaena* isolated from zinc polluted paddy field. *Environmental Pollution*, 263, 114375. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114375>

- Charkiewicz, A. E. y Backstrand, J. R. (2020). Lead Toxicity and Pollution in Poland. *International Journal Of Environmental Research And Public Health*, 17(12), 4385. <https://doi.org/10.3390/ijerph17124385>
- Collin, S., Baskar, A., Geevarghese, D. M., Ali, M. N. V. S., Bahubali, P., Choudhary, R., Lvov, V., Tovar, G. I., Senatov, F., Koppala, S. y Swamiappan, S. (2022). Bioaccumulation of lead (Pb) and its effects in plants: A review. *Journal Of Hazardous Materials Letters*, 3, 100064. <https://doi.org/10.1016/j.hazl.2022.100064>
- Cuba, O. C., Bernedo, F. E. F. y Surco, R. G. C. (2021). Contaminación por metales pesados de la microcuenca agropecuaria del río Huancaray–Perú. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 87(1), 26-38. <https://doi.org/10.37761/rsqp.v87i1.320>
- Davamani, V., Parameshwari, C. I., Arulmani, S., John, J. E. y Poornima, R. (2021). Hydroponic phytoremediation of paperboard mill wastewater by using vetiver (*Chrysopogon zizanioides*). *Journal Of Environmental Chemical Engineering*, 9(4), 105528. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105528>
- Decreto Supremo N° 010-2010-MINAM. (21 de agosto del 2010). Normas Legales N° 424115. Diario Oficial El Peruano
- Dong, X., Huang, W., Bian, Y., Feng, X., Ibrahim, S. A., Shi, D., Qiao, X. y Liu, Y. (2019). Remediation and Mechanisms of Cadmium Biosorption by a Cadmium-Binding Protein from *Lentinula edodes*. *Journal Of Agricultural And Food Chemistry*, 67(41), 11373-11379. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.9b04741>
- Dorafshan, M. M., Abedi-Koupai, J., Eslamian, S. y Amiri, M. J. (2023). Vetiver Grass (*Chrysopogon zizanioides* L.): A Hyper-Accumulator Crop for Bioremediation of Unconventional Water. *Sustainability*, 15(4), 3529. <https://doi.org/10.3390/su15043529>
- Durand, R. y Garcia, C. (2022). *Aplicación del vetiver (Vetiveria Zizanioides), para tratar aguas residuales generadas en una granja porcina, San Martín 2022* [Tesis de título, Universidad César Vallejo]. Repositorio institucional. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/92281>
- Galarza, C. R. (2021). Diseños de investigación experimental. *CienciAmérica*, 10(1), 1-7. <https://doi.org/10.33210/ca.v10i1.356>

- Genchi, G., Sinicropi, M. S., Lauria, G., Carocci, A. y Catalano, A. (2020). The Effects of Cadmium Toxicity. *International Journal of Environmental Research And Public Health*, 17(11), 3782. <https://doi.org/10.3390/ijerph17113782>
- Goswami, R., Bhagat, C., Lollen, I., Neog, N., Barache, U. B., Thakur, R., Mahlknecht, J., & Kumar, M. (2023). Potential arsenic–chromium–lead Co-contamination in the hilly terrain of Arunachal Pradesh, north-eastern India: Genesis and health perspective. *Chemosphere*, 323, 138067. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138067>
- Goykovic, C. V., Ugalde, S. U. y Pacheco, C. P. (2021). Phytoremediator efficiency of vetiver (*Chrysopogon zizanioides* (L.) Roberty) in water contaminated with arsenic and lead. *Idesia (Arica)*, 39(4), 139-145. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292021000400139>
- Hassan, M. U., Nawaz, M., Mahmood, A., Shah, A. A., Shah, A. N., Muhammad, F., Batool, M., Rasheed, A., Jaremko, M., Abdelsalam, N. R., Hasan, M. E. y Qari, S. H. (2022). The role of zinc to mitigate heavy metals toxicity in crops. *Frontiers In Environmental Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.990223>
- Heredia, D. R. (2021). Metales pesados y salud. *Correo Científico Médico*, 25(4). <https://revcocmed.sld.cu/index.php/cocmed/article/view/3702/2024>
- Herrera, V. N. T. y Sumba, D. G. G. (2019). *Islas flotantes artificiales con Vetiver (Vetiveria zizanioides) como alternativa para la remoción de nitratos, fosfatos y plomo en agua procedente del río Cutuchi*. [Tesis de título, Universidad Técnica de Cotopaxi]. Repositorio institucional. <http://repositorio.utc.edu.ec/bitstream/27000/5266/6/PC-000628.pdf>
- Holdridge, L. (1982). Ecología basada en zonas de vida. <http://www.cct.or.cr/contenido/wp-content/uploads/2017/11/Ecologia-Basada-en-Zonas-de-Vida-Libro-IV.pdf>
- Huamani, J. R., Ore, J. B., Abanto, A. L., Ñiquin, J. A., Rojas, L. C., Zavala, A. O., Choque, J. A. y Collana, J. M. (2023). Determination of Potentially Toxic Elements in Quinoa Crops Located in the Huacaybamba–Huanuco-Peru Area. *International Journal Of Membrane Science And Technology*, 10(2), 206-219. <https://doi.org/10.15379/ijmst.v10i2.1181>
- Jeong, H., Byeon, E., Kim, D., Maszczyk, P. y Lee, J. (2023). Heavy metals and metalloid in aquatic invertebrates: A review of single/mixed forms, combination with other pollutants,

and environmental factors. *Marine Pollution Bulletin*, 191, 114959. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.114959>

Kafil, M., Nasab, S. B., Moazed, H. y Bhatnagar, A. (2019). Phytoremediation potential of vetiver grass irrigated with wastewater for treatment of metal contaminated soil. *International Journal Of Phytoremediation*, 21(2), 92-100. <https://doi.org/10.1080/15226514.2018.1474443>

Kaur, H. y Garg, N. (2021). Zinc toxicity in plants: a review. *Planta*, 253(6). <https://doi.org/10.1007/s00425-021-03642-z>

Kaur, H., Srivastava, S., Goyal, N. y Walia, S. (2024). Behavior of zinc in soils and recent advances on strategies for ameliorating zinc phyto-toxicity. *Environmental And Experimental Botany*, 220, 105676. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2024.105676>

Kiiskila, J. D., Li, K., Sarkar, D. y Datta, R. (2020). Metabolic response of vetiver grass (*Chrysopogon zizanioides*) to acid mine drainage. *Chemosphere*, 240, 124961. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124961>

Kriti, N., Basant, N., Singh, J., Kumari, B., Sinam, G., Gautam, A., Singh, G., Swapnil, N., Mishra, K. y Mallick, S. (2021). Nickel and cadmium phytoextraction efficiencies of vetiver and lemongrass grown on Ni–Cd battery waste contaminated soil: A comparative study of linear and nonlinear models. *Journal Of Environmental Management*, 295, 113144. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113144>

Kubier, A., Wilkin, R. T. y Pichler, T. (2019). Cadmium in soils and groundwater: A review. *Applied Geochemistry*, 108, 104388. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2019.104388>

Kumar, A., Kumar, A., S, C. M. M., Chaturvedi, A. K., Shabnam, A. A., Subrahmanyam, G., Mondal, R., Gupta, D. K., Malyan, S. K., Kumar, S. S., Khan, S. A. y Yadav, K. K. (2020). Lead Toxicity: Health Hazards, Influence on Food Chain, and Sustainable Remediation Approaches. *International Journal Of Environmental Research And Public Health*, 17(7), 2179. <https://doi.org/10.3390/ijerph17072179>

Lakshmi, C. S. y Sekhar, Ch. (2020). Role of *Vetiveria zizanioides* in soil protection and carbon sequestration. *The farma innovation*, 9 (9): 492-494.

- Lee, J., Choi, H., Hwang, U., Kang, J., Kang, Y. J., Kim, K. I. y Kim, J. (2019). Toxic effects of lead exposure on bioaccumulation, oxidative stress, neurotoxicity, and immune responses in fish: A review. *Environmental Toxicology And Pharmacology*, 68, 101-108. <https://doi.org/10.1016/j.etap.2019.03.010>
- Li, H., Rao, Z., Sun, G., Wang, M., Yang, Y. X., Zhang, J., Li, H., Pan, M., Wang, J., y Chen, X. W. (2024). Root chemistry and microbe interactions contribute to metal(loid) tolerance of an aromatic plant – Vetiver grass. *Journal Of Hazardous Materials*, 461, 132648. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.132648>
- Liu, X., Ju, Y., Mandzhieva, S., Pinskii, D., Minkina, T., Rajput, V. D., Roane, T., Huang, S., Li, Y., Lena, Q., Clemens, S. y Rensing, C. (2023). Sporadic Pb accumulation by plants: Influence of soil biogeochemistry, microbial community and physiological mechanisms. *Journal Of Hazardous Materials*, 444, 130391. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.130391>
- Mahmood, Q., Asif, M., Shaheen, S., Hayat, M. T. y Ali, S. (2019). Cadmium Contamination in Water and Soil. *Elsevier* (pp. 141-161). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-814864-8.00006-1>
- Mazzocco, J. C., Jagadapillai, R., Gozal, E., Kong, M., Xu, Q., Barnes, G. N. y Freedman, J. H. (2020). Disruption of essential metal homeostasis in the brain by cadmium and high-fat diet. *Toxicology Reports*, 7, 1164-1169. <https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2020.08.005>
- Mercado, D. S., Gutiérrez, M. H. y Ávila, D. S. (2020). Distribución de metales pesados y metaloides en aguas superficiales y sedimentos del río Crucero, Perú. *Revista Boliviana de Química*, 37(4). <https://doi.org/10.34098/2078-3949.37.4.1>
- Mghaiouini, R., Salah, M., Monkade, M. y Bouari, A. E. (2021). New green process to increase the solubility of soil fertilizer based on Potassium Nitrate (KNO₃). *Journal Of The Indian Chemical Society*, 98(12), 100224. <https://doi.org/10.1016/j.jics.2021.100224>
- Miranda, L. S., Ayoko, G. A., Egodawatta, P., Hu, W., Ghidan, O. y Goonetilleke, A. (2021). Physico-chemical properties of sediments governing the bioavailability of heavy metals in urban waterways. *Science Of The Total Environment*, 763, 142984. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142984>

- Nguegang, B., Masindi, V., Makudali, T. A. M. y Tekere, M. (2022). Effective treatment of acid mine drainage using a combination of MgO-nanoparticles and a series of constructed wetlands planted with *Vetiveria zizanioides*: A hybrid and stepwise approach. *Journal Of Environmental Management*, 310, 114751. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114751>
- Norini, M., Thouin, H., Miard, F., Battaglia, B. F., Gautret, P., Guégan, R., Forestier, L. L., Morabito, D., Bourgerie, S. y Motelica, H. M. (2019). Mobility of Pb, Zn, Ba, As and Cd toward soil pore water and plants (willow and ryegrass) from a mine soil amended with biochar. *Journal Of Environmental Management*, 232, 117-130. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.11.021>
- Nugroho, A. P., Butar, E. S., Priantoro, E. A., Sriwuryandari, L., Pratiwi, Z. B. y Sembiring, T. (2021). Phytoremediation of electroplating wastewater by vetiver grass (*Chrysopogon zizanioides* L.). *Scientific Reports*, 11(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-93923-0>
- Nwaehiri, U. L., Akwukwaegbu, P. I. y Nwoke, B. E. B. (2020). Bacterial remediation of heavy metal polluted soil and effluent from paper mill industry. *Environmental Analysis, Health And Toxicology*, 35(2), e2020009. <https://doi.org/10.5620/eaht.e2020009>
- Ochoa, B. H. F., Contreras, E. M., & Mamani, L. E. H. (2022). Nivel de contaminación del suelo con arsénico y metales pesados en Tiquillaca (Perú). *Revista de Investigaciones Altoandinas*, 24(2), 131-138. <https://doi.org/10.18271/ria.2022.416>
- Pandey, V. C. y Praveen, A. (2020). *Vetiveria zizanioides* (L.) Nash – more than a promising crop in phytoremediation. *Elsevier*, 31-62. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-817732-7.00002-x>
- Peinado, D. Ch., Bedriñana, J. C., Barnes, E. P. G., Ríos, E. R., Olarte, E. G. y Chirinos, G. C. (2024). Assessing the Health Risk and Trophic Transfer of Lead and Cadmium in Dairy Farming Systems in the Mantaro Catchment, Central Andes of Peru. *Toxics*, 12(5), 308. <https://doi.org/10.3390/toxics12050308>
- Pinto, M. M. S. C., Ordens, C. M., De Melo, M. T. C., Inácio, M., Almeida, A., Pinto, E., y Da Silva, E. A. F. (2019). An Inter-disciplinary Approach to Evaluate Human Health Risks Due to Long-Term Exposure to Contaminated Groundwater Near a Chemical Complex. *Exposure And Health*, 12(2), 199-214. <https://doi.org/10.1007/s12403-019-00305-z>

- Quispe, N., Zanabria, D., Chavez, E., Cuadros, F., Carling, G. y Paredes, B. (2021). Health risk assessment of heavy metals (Hg, Pb, Cd, Cr and As) via consumption of vegetables cultured in agricultural sites in Arequipa, Peru. *Chemical Data Collections*, 33, 100723. <https://doi.org/10.1016/j.cdc.2021.100723>
- Rahman, Z., & Singh, V. P. (2019). The relative impact of toxic heavy metals (THMs) (arsenic (As), cadmium (Cd), chromium (Cr)(VI), mercury (Hg), and lead (Pb)) on the total environment: an overview. *Environmental Monitoring And Assessment*, 191(7). <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7528-7>
- Resolución Jefatural N° 300 – ANA- 2019. (31 de diciembre del 2019). Diario Oficial El Peruano.
- Rigoletto, M., Calza, P., Gaggero, E., Malandrino, M. y Fabbri, D. (2020). Bioremediation Methods for the Recovery of Lead-Contaminated Soils: A Review. *Applied Sciences*, 10(10), 3528. <https://doi.org/10.3390/app10103528>
- Rodrigues, F. S. H., Días, K. L. L. D., Vidal, L. D. S., De Medeiros, C. R. B., Roderigues, J. C. M. y Silva, L. S. (2021). Development and morphometric characteristics of vetiver grass under different doses of organic fertilizer. *Revista Caatinga*, 34(1), 20-30. <https://doi.org/10.1590/1983-21252021v34n103rc>
- Sawyer, A., Staley, C., Lamb, J., Sheaffer, C., Kaiser, T., Gutknecht, J., Sadowsky, M. J. y Rosen, C. (2019). Cultivar and phosphorus effects on switchgrass yield and rhizosphere microbial diversity. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 103(4), 1973-1987. <https://doi.org/10.1007/s00253-018-9535-y>
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. [SENAMHI]. (2023). Datos meteorológicos a nivel nacional.
- Shahid, M., Natasha, N., Bibi, I., Iqbal, J., Khalid, S., Murtaza, B., Bakhat, H. F., Farooq, A. B. U., Amjad, M., Hammad, H. M., Niazi, N. K. y Arshad, M. (2022). Zinc in soil-plant-human system: A data-analysis review. *Science Of The Total Environment*, 808, 152024. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152024>
- Sidhu, G. P. S., Bali, A. S., Singh, H. P., Batish, D. R. y Kohli, R. K. (2020). Insights into the tolerance and phytoremediation potential of *Coronopus didymus* L. (Sm) grown under

zinc stress. *Chemosphere*, 244, 125350.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125350>

Silva, C. A., De Barros, E. S., Pereira, I. M., Amaral, W., Da Silva, M. A. P. y Nardis, B. O. (2019). Vetiver growth with different fertilizations in quartzite mining tailings. *Floresta e Ambiente*, 26(1). <https://doi.org/10.1590/2179-8087.026316>

Sobolev, N., Ellingsen, D. G., Belova, N., Aksenov, A., Sorokina, T., Trofimova, A., Varakina, Y., Kotsur, D., Grjibovski, A. M., Chashchin, V., Bogolitsyn, K. y Thomassen, Y. (2021). Essential and non-essential elements in biological samples of inhabitants residing in Nenets Autonomous Okrug of the Russian Arctic. *Environment International*, 152, 106510. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106510>

Tatis, N. P. C. y Martínez, K. J. S. (2019). *Evaluación de las concentraciones de cadmio, plomo, zinc y cromo en especies ícticas del departamento de la Guajira-Colombia y riesgo de exposición en humanos* [Tesis de título, Universidad de la Costa]. Repositorio institucional. <http://repositorio.cuc.edu.co/handle/11323/5159?locale-attribute=es>

Tito, D. H. (2021). *Fitorremediación con la especie vetiver (Chrysopogon zizanioides) para mejorar la calidad ambiental del agua del canal de riego CIMIRM en el distrito de Hualhuas, región Junín, 2021*. [Tesis de título, Universidad Continental]. Repositorio institucional. <https://hdl.handle.net/20.500.12394/12576>

Wu, Y., Liu, Z., Yang, G. X., Yang, P., Peng, P. Y., Chen, C., Xue, F., Liu, T., Liu, H. L. y Liu, S. Q. (2022). Combined effect of humic acid and vetiver grass on remediation of cadmium-polluted water. *Ecotoxicology And Environmental Safety*, 244, 114026. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.114026>

Yan, A., Wang, Y., Tan, S. N., Yusof, M. L. M., Ghosh, S. y Chen, Z. (2020). Phytoremediation: A Promising Approach for Revegetation of Heavy Metal-Polluted Land. *Frontiers In Plant Science*, 11. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00359>

Yaashikaa, P., Kumar, P. S., Jeevanantham, S. y Saravanan, R. (2022). A review on bioremediation approach for heavy metal detoxification and accumulation in plants. *Environmental Pollution*, 301, 119035. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119035>

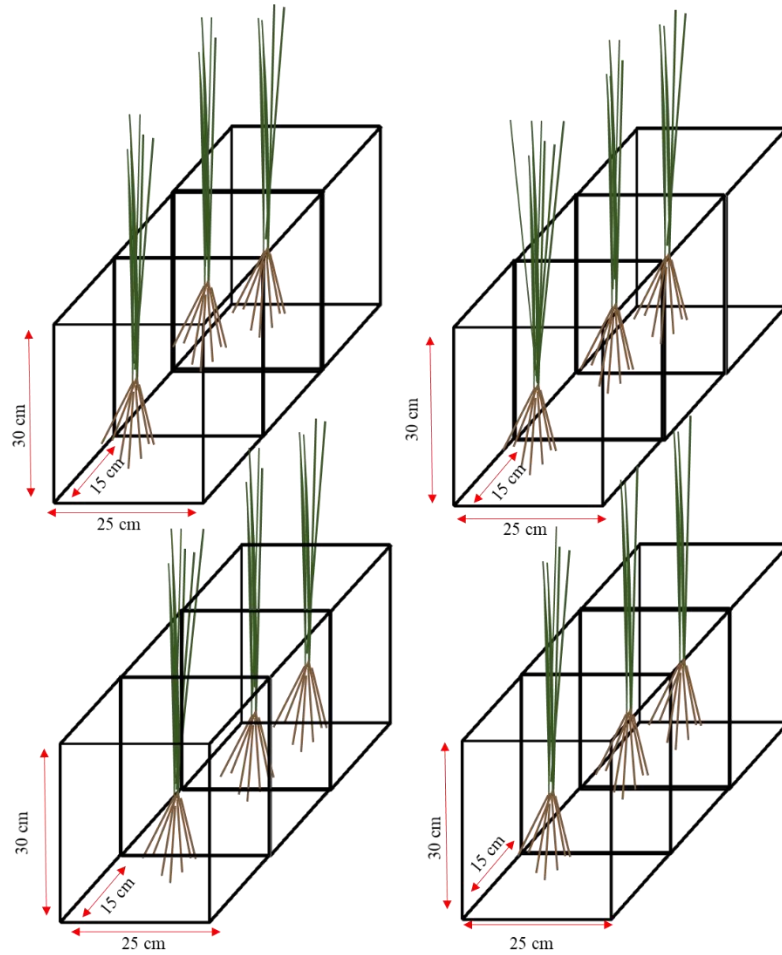
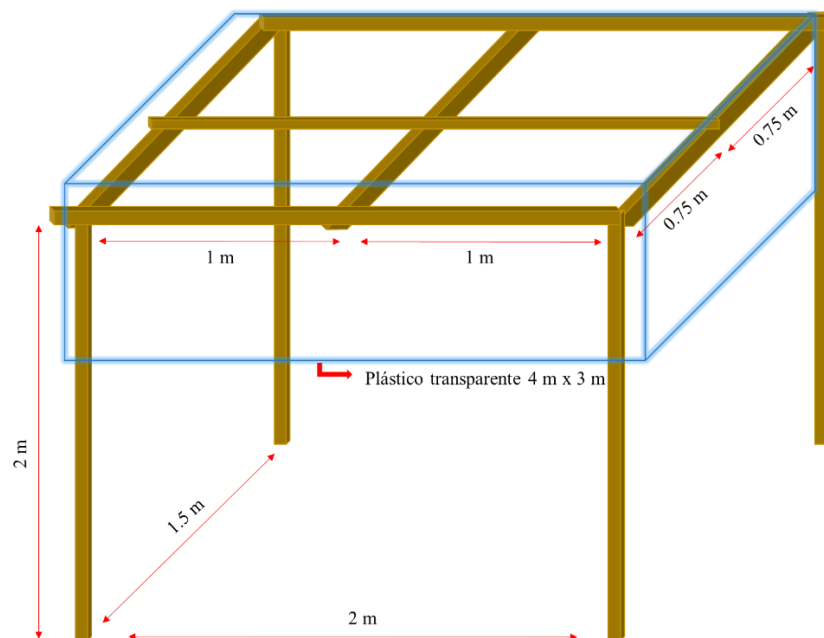
- Yana, R. F. Q., Quispe, G. B., Betancur, H. N. C., Cáceres, S. H., Mendoza, A. P. C. y Miranda, P. S. Y. (2019). Concentración de metales pesados: cromo, cadmio y plomo en los sedimentos superficiales en el río Coata, Perú. *Revista Boliviana de Química*, 2(36.2). <https://doi.org/10.34098/2078-3949.36.2.3>
- Zhao, R., Cao, X., Li, X., Li, T., Zhang, H., Cui, X. y Cui, Z. (2023). Ecological toxicity of Cd, Pb, Zn, Hg and regulation mechanism in *Solanum nigrum* L. *Chemosphere*, 313, 137447. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.137447>
- Zúñiga, P. I. V., Cedeño, R. J. C. y Palacios, I. A. M. (2023). Metodología de la investigación científica: guía práctica. *Ciencia Latina*, 7(4), 9723-9762. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i4.7658

ANEXOS

ANEXO A. Datos del acondicionamiento de los esquejes de *C. zizanioides*.

Tabla 11. . Longitud final de los brotes y raíces de los esquejes de *C. zizanioides*.

Esqueje	Longitud inicial del brote (cm)	Longitud final del brote (cm)	Longitud de la Raíz (cm)
1	10	28.3	16.3
2	10	30.2	18.7
3	10	28	16.2
4	10	28.4	16.8
5	10	28.2	16.6
6	10	27.9	16.2
7	10	27.4	16
8	10	29	18.3
9	10	29.7	18.3
10	10	28.5	16.9
11	10	29.9	17
12	10	28.4	16.3
Longitud promedio		28.66	16.97

ANEXO B. Diseño de los sistemas.**Figura 6.** Diseño de los sistemas para el acondicionamiento.**Figura 7.** Diseño del armazon del techo.

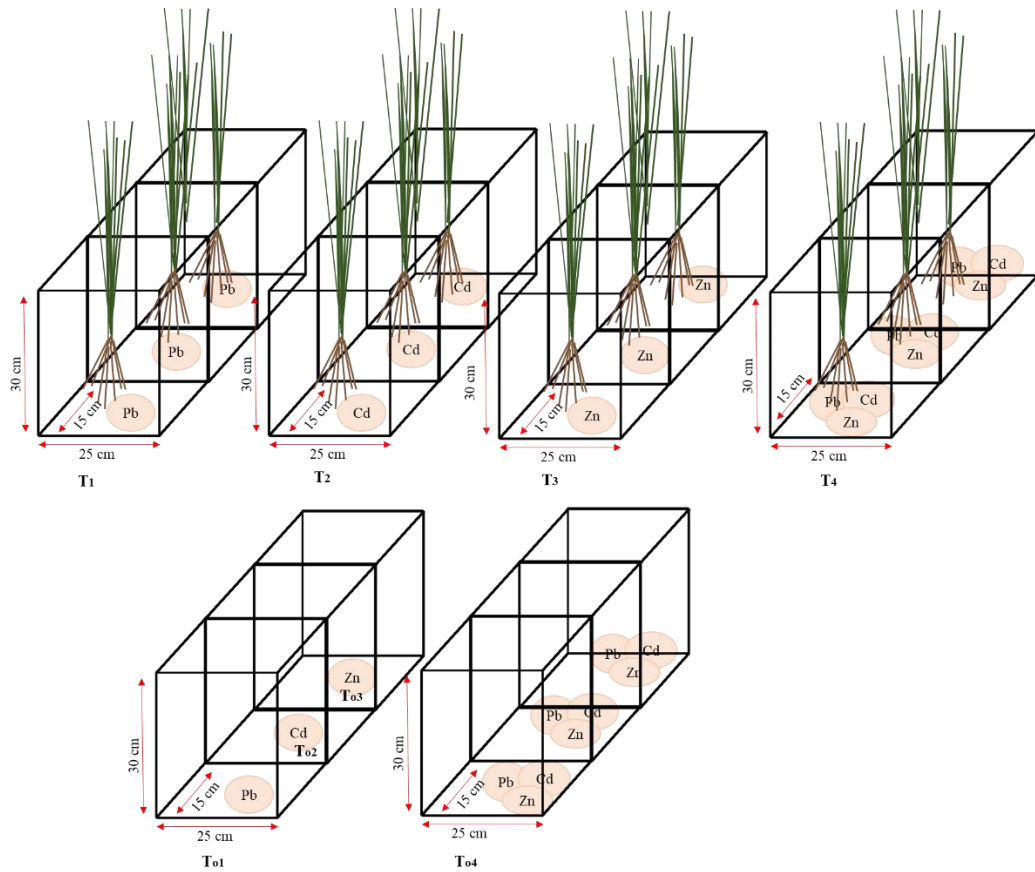


Figura 8. Diseño de los sistemas tipo batch.

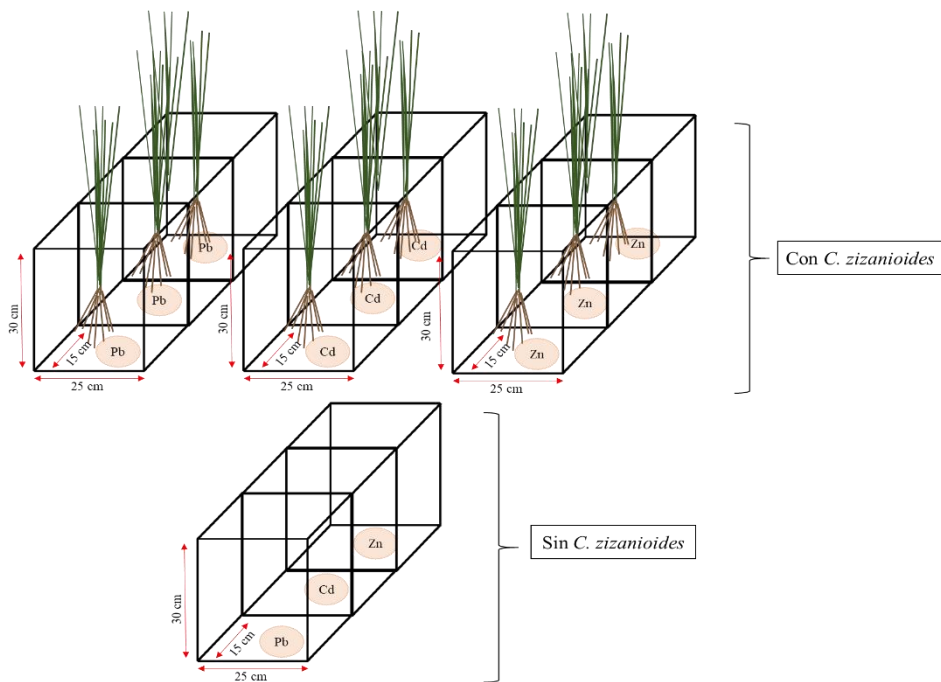


Figura 9. Diseño de los sistemas con y sin *C. zizanioides*.

ANEXO C. Cálculos de la masa de los compuestos inoculados.

- **Para concentración de 15 ppm de Pb**

$$m = 15 \frac{\text{mg}}{\text{L}} * 5\text{L}$$

$$\mathbf{m = 75 \text{ mg de Pb}}$$

$$m_{\text{compuesto}} = \frac{75 \text{ mg de Pb} * 331,21 \text{ mg Pb (NO}_3)_2}{207,2 \text{ mg Pb}}$$

$$\mathbf{m_{\text{compuesto}} = 119,88 \text{ mg Pb (NO}_3)_2}$$

$$m_f = \frac{119,89 \text{ mg Pb (NO}_3)_2 * 100 \%}{99 \%}$$

$$\mathbf{m_f = 121,10 \text{ mg Pb (NO}_3)_2}$$

- **Para concentración de 5 ppm de Pb**

$$m_f = \frac{121,10 \text{ mg Pb (NO}_3)_2}{3}$$

$$\mathbf{m_f = 40,37 \text{ mg Pb (NO}_3)_2}$$

- **Para concentración de 15 ppm de Cd**

$$m = 15 \frac{\text{mg}}{\text{L}} * 5\text{L}$$

$$\mathbf{m = 75 \text{ mg de Cd}}$$

$$m_{\text{compuesto}} = \frac{75 \text{ mg de Cd} * 256,51 \text{ mg Cd SO}_4 \cdot \frac{8}{3} \text{ H}_2\text{O}}{112,41 \text{ mg Cd}}$$

$$\mathbf{m_{\text{compuesto}} = 171,14 \text{ mg Cd SO}_4 \cdot \frac{8}{3} \text{ H}_2\text{O}}$$

$$m_f = \frac{171,14 \text{ mg Cd SO}_4 \cdot \frac{8}{3} \text{ H}_2\text{O} * 100 \%}{99 \%}$$

$$\mathbf{m_f = 172,87 \text{ mg Cd SO}_4 \cdot \frac{8}{3} \text{ H}_2\text{O}}$$

- **Para concentración de 5 ppm de Cd**

$$m_f = \frac{172,87 \text{ mg Cd SO}_4 \cdot \frac{8}{3} \text{ H}_2\text{O}}{3}$$

$$m_f = 57,62 \text{ mg Cd SO}_4 \cdot \frac{8}{3} \text{ H}_2\text{O}$$

- **Para concentración de 15 ppm de Zn**

$$m = 15 \frac{\text{mg}}{\text{L}} * 5\text{L}$$

$$m = 75 \text{ mg de Zn}$$

$$m_{\text{compuesto}} = \frac{75 \text{ mg de Zn} * 287,54 \text{ mg Zn SO}_4 \cdot 7 \text{ H}_2\text{O}}{65,38 \text{ mg Zn}}$$

$$m_{\text{compuesto}} = 329,85 \text{ mg Zn SO}_4 \cdot 7 \text{ H}_2\text{O}$$

$$m_f = \frac{329,85 \text{ mg Zn SO}_4 \cdot 7 \text{ H}_2\text{O} * 100 \%}{99,5 \%}$$

$$m_f = 331,51 \text{ mg Zn SO}_4 \cdot 7 \text{ H}_2\text{O}$$

- **Para concentración de 5 ppm de Zn**

$$m_f = \frac{331,51 \text{ mg Zn SO}_4 \cdot 7 \text{ H}_2\text{O}}{3}$$

$$m_f = 110,50 \text{ mg Zn SO}_4 \cdot 7 \text{ H}_2\text{O}$$

ANEXO D. Prueba t y medidas de tendencia central: DE (Desviación estándar) y CV (Coeficiente de variación).

Tabla 12. Indicadores evaluados de la investigación.

Indicadores	Media (cm)	DE(cm)	CV (%)
Longitud de brote	28,66	0,86	3,01
Longitud de raíz	16,97	0,94	5,54

DE: Desviación estándar, CV: Coeficiente de variación.

Tabla 13. Eficiencia de remoción individual de Pb, después de 10 días de tratamiento.

<i>C. zizanioides</i>	Media (%)	DE (%)	CV (%)	t	p-valor
No	37,07	1,51	4,07	-58,87	0,01
Sí	99,88	0,11	0,11		

Tabla 14. Eficiencia de remoción individual del Cd, después de 10 días de tratamiento.

<i>C. zizanioides</i>	Media (%)	DE (%)	CV (%)	t	p-valor
No	48,00	1,89	3,93	-38,78	0,02
Sí	99,64	0,12	0,12		

Tabla 15. Eficiencia de remoción individual de Zn, después de 10 días de tratamiento.

<i>C. zizanioides</i>	Media (%)	DE (%)	CV (%)	t	p-valor
No	27,20	-	-	43,94	<0,001
Sí	90,62	2,50	2,76		

-: No se calculó debido a solo una repetición.

Tabla 16. Eficiencia de remoción conjunta de Pb, Cd y Zn, después de 10 días de tratamiento.

Metal pesado	<i>C. zizanioides</i>	Media	DE	CV (%)	t	p-valor
Pb	No	28,00	-	-	62,36	<0,01
	Sí	94,00	1,83	1,9562		
Cd	No	32,80	-	-	119,97	<0,01
	Sí	95,27	0,90	0,95		
Zn	No	13,60	-	-	118,07	<0,01
	Sí	95,40	1,20	1,26		

ANEXO E. Panel fotográfico

Figura 10. Instalación del techo.



Figura 11. Instalación de los sistemas para el acondicionamiento del *C. zizanioides*.



Figura 12. Crecimiento del *C. zizanioides* después de 20 días de acondicionamiento.



Figura 13. Pesaje del $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$.



Figura 14. Preparación de los compuestos.



Figura 15. Adición de los compuestos en cada sistema.



Figura 16. Sistemas después de 10 días de tratamiento.



Figura 17. *C. zizanioides* después de 10 días de tratamiento.

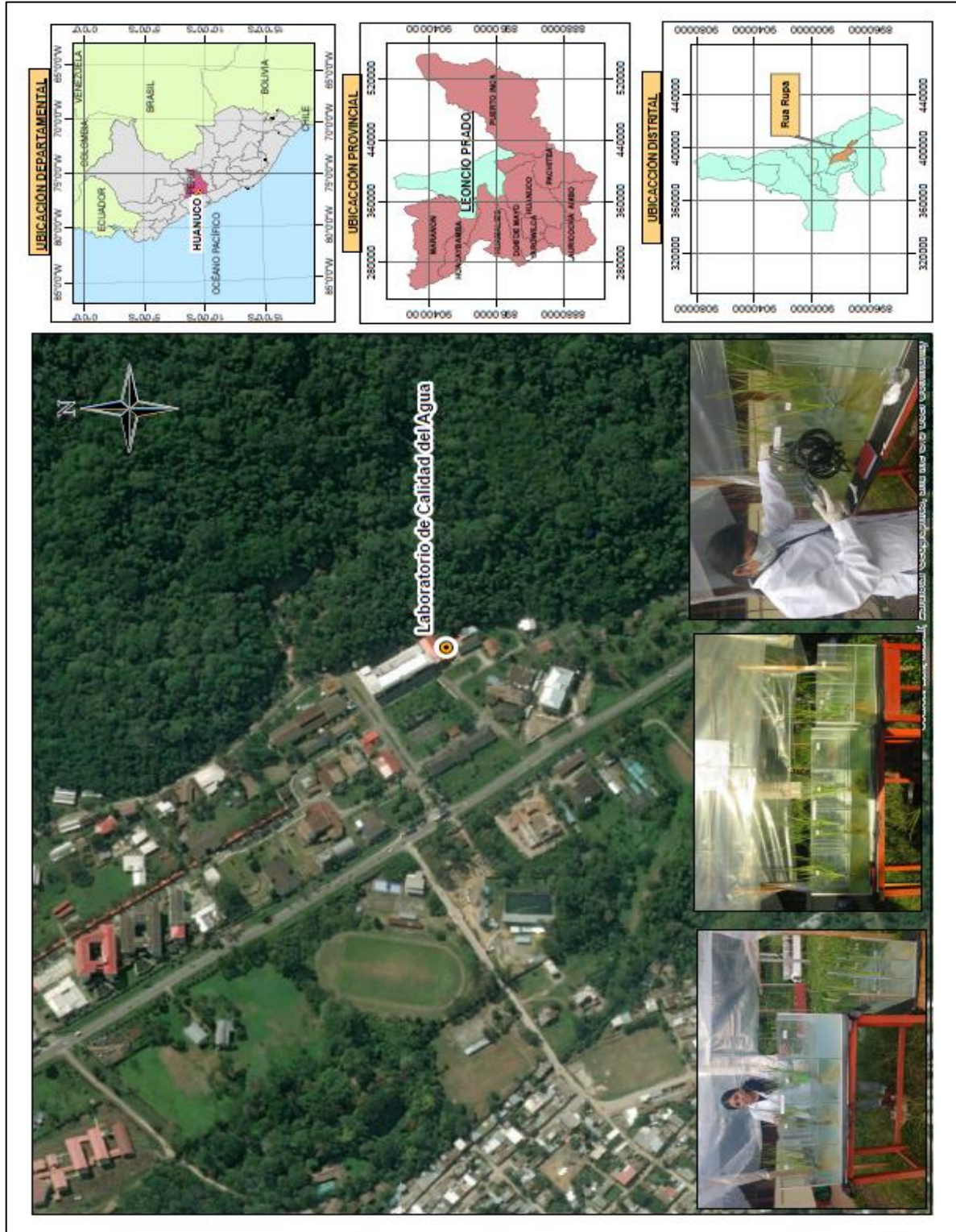


Figura 18. Ubicación del Laboratorio de Calidad de Agua de la Universidad Nacional Agraria de la Selva.



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

Tingo Maria

Facultad de Agronomía - Laboratorio de Análisis de Suelos

Av. Universitaria s/n Telf. (062) 562342 - Celular 941531359 Aptdo. 156

analisis@suelos.unas@hotmmail.com



ANÁLISIS ESPECIAL

SOLICITANTE:			TATIANA YEN PUMAHUALI				RUPA RUPA - LEONCIO PRADO - HUANUCO								
Datos de la muestra			Porcentaje				PARTES POR MILLON (mg / L de agua)								
Código	Referencia	Tipo	Materia Seca (%)	Humedad (%)	Ceniza en base Húmeda (%)	N (base seca) (%)	Mg (%)	K (%)	Na (%)	Cd ppm	Pb ppm	Zn ppm	Fe ppm	Cu ppm	Mn ppm
M0862	P To 1	AGUA	-	-	-	-	-	-	-	-	9.280	-	-	-	-
M0863	P To 1'	AGUA	-	-	-	-	-	-	-	-	9.600	-	-	-	-
M0864	P T1R1	AGUA	-	-	-	-	-	-	-	-	0.034	-	-	-	-
M0865	P T1R2	AGUA	-	-	-	-	-	-	-	-	ND	-	-	-	-
M0866	P T1R3	AGUA	-	-	-	-	-	-	-	-	0.020	-	-	-	-
M0867	C To 2	AGUA	-	-	-	-	-	-	-	-	7.600	-	-	-	-
M0868	C To 2'	AGUA	-	-	-	-	-	-	-	-	8.000	-	-	-	-
M0869	C T2R1	AGUA	-	-	-	-	-	-	-	-	0.074	-	-	-	-
M0870	C T2R2	AGUA	-	-	-	-	-	-	-	-	0.050	-	-	-	-
M0871	C T2R3	AGUA	-	-	-	-	-	-	-	-	0.038	-	-	-	-
M0872	Z To 3	AGUA	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10.92	-	-	-
M0873	Z T3R1	AGUA	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.78	-	-	-
M0874	Z T3R2	AGUA	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.41	-	-	-
M0875	Z T3R3	AGUA	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.03	-	-	-
M0876	Z To 4	AGUA	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
M0877	PCZ T4R1	AGUA	-	-	-	-	-	-	-	-	3.360	3.600	4.32	-	-
M0878	PCZ T4R2	AGUA	-	-	-	-	-	-	-	-	0.240	0.320	0.29	-	-
M0879	PCZ T4R3	AGUA	-	-	-	-	-	-	-	-	0.280	0.380	0.23	-	-
			-	-	-	-	-	-	-	-	0.190	0.200	0.17	-	-

Figura 19. Resultados de la concentración final del medio acuoso de Pb, Cd y Zn.