TESIS UANCV
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN
"OFICINA DE INVESTIGACIÓN"

UNIVERSIDAD ANDINA

NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ

FACULTAD DE INGENIERÍAS Y CIENCIAS PURAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL

FITORREMEDIACIÓN DE PLOMO, CADMIO Y COBRE EN SUELOS ALEDAÑOS AL BOTADERO DE CANCHARANI MEDIANTE STIPA ICHU Y FESTUCA DOLICHOPHYLLA PUNO 2025

TESIS PRESENTADA POR:

Bach. JORGE RAUL ZONA CASSA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO SANITARIO Y AMBIENTAL

JULIACA – PERÚ

2025

OFICINA DE INVESTIGACIÓN
Tesis Publicada con autorización del autor
http://repositorio.uancv.edu.pe/

TESIS UANCV

VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN
"OFICINA DE INVESTIGACIÓN"

UNIVERSIDAD ANDINA

NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ

FACULTAD DE INGENIERÍAS Y CIENCIAS PURAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL

FITORREMEDIACIÓN DE PLOMO, CADMIO Y COBRE EN SUELOS ALEDAÑOS AL BOTADERO DE CANCHARANI MEDIANTE STIPA ICHU Y FESTUCA DOLICHOPHYLLA PUNO 2025

TESIS PRESENTADA POR:

Bach. JORGE RAUL ZONA CASSA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO SANITARIO Y AMBIENTAL

APROBADA POR EL JURADO REVISOR:

PRESIDENTE : _____
Dr. OSCAR VICENTE VIAMONTE CALLA

PRIMER MIEMBRO : _____
Mgtr. FRANZ JOSEPH BARAHONA PERALES

SEGUNDO MIEMBRO : _____
M.Sc. JESÚS ESTEBAN CASTILLO MACHACA

ASESOR DE TESIS : _____
Ing. ADWAR RANULFO SANCHEZ CARREON

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN : SANEAMIENTO AMBIENTAL - P22

OFICINA DE INVESTIGACIÓN
Tesis Publicada con autorización del autor
http://repositorio.uancv.edu.pe/

TESIS UANCV
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN
"OFICINA DE INVESTIGACIÓN"

UNIVERSIDAD ANDINA
NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ

RESOLUCIÓN DECANAL Nº 1658-2025-D-UI-FICP-UANCV

Juliaca, 02 de diciembre del 2025

VISTO: El expediente **N° 2025 - CU - 12339** presentado por el (la) Bachiller: **JORGE RAUL ZONA CASSA** estudiante de la Escuela Profesional de **Ingeniería Sanitaria y Ambiental** de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras quien solicita **NOMINACIÓN DE JURADOS Y PROGRAMACIÓN DE FECHA Y HORA DE SUSTENTACIÓN.**

CONSIDERANDO:

Que, el (la) Bach. **JORGE RAUL ZONA CASSA,** quien solicita **NOMINACIÓN DE JURADOS Y PROGRAMACIÓN DE FECHA Y HORA DE SUSTENTACIÓN** de la Tesis Titulada: **FITORREMEDIACIÓN DE PLOMO, CADMIO Y COBRE EN SUELOS ALEDAÑOS AL BOTADERO DE CANCHARANI MEDIANTE STIPA ICHU Y FESTUCA DOLICHOPHYLLA PUNO 2025**, la misma que pertenece a la linea de investigación **SANEAMIENTO AMBIENTAL** para optar el Titulo Profesional de **Ingeniero Sanitario y Ambiental.**

Que, al haberse cumplido con los requisitos exigidos por el reglamento interno de trabajos de investigación conducente a grados y titulos mediante Resolución N° 0294-2023 UANCV-CU-R. y en concordancia con el dictamen de similitud.

De conformidad al Reglamento Interno de Trabajos de Investigación Conducente a Grados y Titulos aprobado con Resolución N° 0294-2023 UANCV-CU-R. y en merito al Art. 24, Art. 28 del reglamento, con fines de obtención de Grados Académicos y Titulos Profesionales, y en uso a las atribuciones, que le concede la ley Universitaria Nº 30220, ley de creación de la UANCV Nº 23738 y modificatoria Nº 24661, y el Estatuto de la UANCV, el Decano y el Director de la Unidad de Investigación de la Facultad de Ingenierias y Ciencias Puras.

RESUELVE:

ARTÍCULO PRIMERO. APROBAR, la **NOMINACIÓN DE JURADOS** integrado por los siguientes docentes:

- **Presidente** : Dr. OSCAR VICENTE VIAMONTE CALLA
- **1er Miembro** : Mgtr. FRANZ JOSEPH BARAHONA PERALES
- **2do Miembro** : M.Sc. JESÚS ESTEBAN CASTILLO MACHACA

ARTICULO SEGUNDO. RECONOCER como asesor de la investigación (tesis) de la Facultad de Ingenierias y Ciencias Puras al (a la) docente, **Ing. ADWAR RANULFO SANCHEZ CARREON.**

ARTICULO TERCERO. APROBAR, la **FECHA Y HORA DE SUSTENTACIÓN DE LA TESIS** de él (la) bachiller: **JORGE RAUL ZONA CASSA;** del informe final de la investigación (tesis) titulada: **FITORREMEDIACIÓN DE PLOMO, CADMIO Y COBRE EN SUELOS ALEDAÑOS AL BOTADERO DE CANCHARANI MEDIANTE STIPA ICHU Y FESTUCA DOLICHOPHYLLA PUNO 2025** para optar el Titulo Profesional de **Ingeniero Sanitario y Ambiental.** de acuerdo al siguiente detalle:

- **FECHA** : jueves 11 de diciembre del 2025
- **HORA** : 15:30 horas
- **LUGAR** : Aula 406 - FICP

ARTÍCULO CUARTO. DISPONER que, la Unidad de Investigación, Responsables del Comité de Investigación de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras y el Director de la Escuela Profesional de **Ingeniería Sanitaria y Ambiental** quedan encargados del cumplimiento de la presente Resolución.

Regístrese, Comuníquese, Archívese.

UNIVERSIDAD ANDINA "NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ"
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y CS. PURAS
Dr. OSCAR V. VIAMONTE CALLA
DECANO (e)
CIP. 32730

UNIVERSIDAD ANDINA "NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ"
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y CIENCIAS PURAS
Dr. César G. Camargo Nájar
DIRECTOR
UNIDAD DE INVESTIGACIÓN

cc.
Archivo
interesado (a)

OFICINA DE INVESTIGACIÓN
Tesis Publicada con autorización del autor
http://repositorio.uancv.edu.pe/

TESIS UANCV
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN
"OFICINA DE INVESTIGACIÓN"

RESOLUCIÓN DECANAL N° 1466-2025-D-UI-FICP-UANCV

Juliaca, 05 de noviembre del 2025

VISTO: El expediente **N° 2025-CU-10614** por el señor (a): **JORGE RAUL ZONA CASSA** quien solicita **REVISIÓN DEL INFORME FINAL DE LA INVESTIGACIÓN (borrador de tesis)**, el PROVEIDO – **N° 1032-2025**-UI-FICP-UANCV/J, y la **FICHA DE OPINIÓN DEL INFORME FINAL DE LA INVESTIGACION (BORRADOR DE TESIS)** formato **N° 071 - 2025** del integrante del comité de investigación **EPISA** de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras, según al reglamento interno de trabajos de investigación conducente a grados y títulos.

CONSIDERANDO:

Que, el señor (a): **JORGE RAUL ZONA CASSA,** ha presentado su informe final de la investigación (borrador de tesis) Titulada: **FITORREMEDIACIÓN DE PLOMO, CADMIO Y COBRE EN SUELOS ALEDAÑOS AL BOTADERO DE CANCHARANI MEDIANTE STIPA ICHU Y FESTUCA DOLICHOPHYLLA PUNO 2025**, para optar el Título Profesional de **Ingeniero Sanitario y Ambiental.**

Que, al haberse cumplido con los requisitos exigidos por el Reglamento Interno de Trabajo de Investigación Conducente a Grados y Títulos, con fines de obtención de Grados Académicos y Títulos Profesionales; el integrante del comité de investigación **M.Sc. Jesús Esteban Castillo Machaca** de la Escuela Profesional de **Ingeniería Sanitaria y Ambiental** de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras, emitió la ficha de opinión del informe final de la investigación (borrador de tesis) formato N° 071 - 2025 **aprobando** el informe final de la investigación (borrador de tesis) titulado: **FITORREMEDIACIÓN DE PLOMO, CADMIO Y COBRE EN SUELOS ALEDAÑOS AL BOTADERO DE CANCHARANI MEDIANTE STIPA ICHU Y FESTUCA DOLICHOPHYLLA PUNO 2025**, Correspondiente a la línea de investigación **SANEAMIENTO AMBIENTAL.**

Que, al haberse cumplido con los requisitos exigidos por el reglamento interno de trabajos de investigación conducentes a grados y títulos mediante Resolución N° 0294-2023 UANCV-CU-R. y estando a la opinión favorable del comité de investigación respecto al informe final de la investigación (borrador de tesis).

Estando, con la opinión favorable del Comité de Investigación de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras y en concordancia al Reglamento Interno de Trabajos de Investigación Conducente a Grados y Títulos aprobado con Resolución N° 0294-2023 UANCV-CU-R. y en merito al Art. 27 del reglamento, con fines de obtención de Grados Académicos y Títulos Profesionales, y en uso a las atribuciones, que le concede la ley Universitaria Nº 30220, ley de creación de la UANCV Nº 23738 y modificatoria Nº 24661, y el Estatuto de la UANCV, el Decano y el Director de la Unidad de Investigación de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras.

RESUELVE:

ARTÍCULO PRIMERO.- **APROBAR**, el **INFORME FINAL DE LA INVESTIGACIÓN (BORRADOR DE TESIS)**, para la **REVISIÓN DE SIMILITUD TURNITIN,** presentado por el señor (a): **JORGE RAUL ZONA CASSA,** para optar el Título Profesional de Ingeniero Sanitario y Ambiental, con el Tema Titulada: **FITORREMEDIACIÓN DE PLOMO, CADMIO Y COBRE EN SUELOS ALEDAÑOS AL BOTADERO DE CANCHARANI MEDIANTE STIPA ICHU Y FESTUCA DOLICHOPHYLLA PUNO 2025** correspondiente a la línea de investigación **SANEAMIENTO AMBIENTAL,** en virtud a los considerandos expuestos.

ARTÍCULO SEGUNDO.- RATIFICAR como **ASESOR DE INVESTIGACIÓN** al (a la), **Ing. ADWAR RANULFO SANCHEZ CARREON.**

ARTÍCULO TERCERO.- **DISPONER** que, la Unidad de Investigación, Responsables del Comité de Investigación de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras y el Director de la Escuela Profesional de **Ingeniería Sanitaria y Ambiental** quedan encargados del cumplimiento de la presente Resolución.

Regístrese, Comuníquese, Archívese.

UNIVERSIDAD ANDINA "NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ"
FACULTAD DE INGENIERIAS Y CS. PURAS
Dr. OSCAR V. VIAMONTE CALLA
DECANO (e)
CID: 32730

UNIVERSIDAD ANDINA "NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ"
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y CIENCIAS PURAS
DIRECTOR
Dr. Fritz Willy Mamani Apaza
DIRECTOR
UNIDAD DE INVESTIGACIÓN

cc.
Archivo
interesado (a)

OFICINA DE INVESTIGACIÓN
Tesis Publicada con autorización del autor
http://repositorio.uancv.edu.pe/

TESIS UANCV
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN
"OFICINA DE INVESTIGACIÓN"

RESOLUCIÓN DECANAL N° 1041-2025-D-UI-FICP-UANCV

Juliaca, 10 de septiembre del 2025

VISTO: El expediente N° 2025-CU- 6749, presentado por el señor (a) JORGE RAUL ZONA CASSA solicitando APROBACIÓN DE LA PROPUESTA DE INVESTIGACIÓN el PROVEIDO – N° 746-2025-UI-FICP-UANCV/J, y la FICHA DE OPINIÓN DE LA PROPUESTA DE INVESTIGACIÓN formato N° 062-2025 del integrante del comité de investigación EPISA de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras, según al reglamento interno de trabajos de investigación conducente a grados y títulos.

CONSIDERANDO:

Que, el señor (a): JORGE RAUL ZONA CASSA ha presentado su propuesta de investigación Titulada: FITORREMEDIACIÓN DE PLOMO, CADMIO Y COBRE EN SUELOS ALEDAÑOS AL BOTADERO DE CANCHARANI MEDIANTE STIPA ICHU Y FESTUCA DOLICHOPHYLLA PUNO 2025, para optar el Título Profesional de Ingeniero Sanitario y Ambiental.

Que, al haberse cumplido con los requisitos exigidos por el Reglamento Interno de Trabajo de Investigación Conducente a Grados y Títulos, con fines de obtención de Grados Académicos y Títulos Profesionales; el integrante del comité de investigación MSc. Jesus Esteban Castillo Machaca de la Escuela Profesional de Ingeniería Sanitaria y Ambiental de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras, emitió la ficha de opinión de la propuesta de investigación formato N° 062-2025- aprobando la propuesta de investigación titulada: FITORREMEDIACIÓN DE PLOMO, CADMIO Y COBRE EN SUELOS ALEDAÑOS AL BOTADERO DE CANCHARANI MEDIANTE STIPA ICHU Y FESTUCA DOLICHOPHYLLA PUNO 2025.

Que, es requisito indispensable contar con un asesor docente ordinario y/o contratado de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras con un mínimo de cinco años de docencia, grado de doctor o magister y experiencia en la línea a investigar, o deberá estar acreditado por Resolución 0989-2022-UANCV-CU-R, quien asumirá como asesor de la propuesta de investigación, según el área o grado.

Estando, con la opinión favorable de la propuesta de investigación del Comité de Investigación de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras y en concordancia al Reglamento Interno de Trabajos de Investigación Conducente a Grados y Títulos aprobado con Resolución N° 0294-2023 UANCV-CU-R. y en merito al Art. 25 del reglamento, con fines de obtención de Grados Académicos y Títulos Profesionales, y en uso a las atribuciones, que le concede la ley Universitaria N° 30220, ley de creación de la UANCV N° 23738 y modificatoria N° 24661, y el Estatuto de la UANCV, el Decano y el Director de la Unidad de Investigación de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras.

RESUELVE:

ARTÍCULO PRIMERO.- **APROBAR**, la **PROPUESTA DE INVESTIGACIÓN**, presentado por el señor (a): JORGE RAUL ZONA CASSA, para optar el Título Profesional de Ingeniero Sanitario y Ambiental, con el Tema Titulada: FITORREMEDIACIÓN DE PLOMO, CADMIO Y COBRE EN SUELOS ALEDAÑOS AL BOTADERO DE CANCHARANI MEDIANTE STIPA ICHU Y FESTUCA DOLICHOPHYLLA PUNO 2025 correspondiente a la línea de investigación SANEAMIENTO AMBIENTAL.

La misma que deberá proceder con la ejecución de la propuesta de Investigación aprobado de acuerdo a lo establecido en el Reglamento Interno de Trabajo de Investigación Conducente a Grados y Títulos, con fines de obtención de Grados Académicos y Títulos Profesionales.

ARTÍCULO SEGUNDO.- RECONOCER como **ASESOR DE INVESTIGACIÓN** de al (a la) docente Ing. ADWAR RANULFO SANCHEZ CARREON.

ARTÍCULO TERCERO.- **DISPONER** que, la Unidad de Investigación, Responsables del Comité de Investigación de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras y el Director de la Escuela Profesional de Ingeniería Sanitaria y Ambiental quedan encargados del cumplimiento de la presente Resolución.

Regístrese, Comuníquese, Archívese.

UNIVERSIDAD ANDINA "NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ"
FACULTAD DE INGENIERIAS Y Cs. PURAS
Dr. OSCAR V. VIAMONTE CALLA
DECANO (e)
CIP 32730

UNIVERSIDAD ANDINA "NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ"
FACULTAD DE INGENIERIAS Y CIENCIAS PURAS
DIRECTOR
Dr. Fritz Willy Mamani Apaza
DIRECTOR
UNIDAD DE INVESTIGACIÓN

cc.
Archivo 2025
Interesado (a)

OFICINA DE INVESTIGACIÓN
Tesis Publicada con autorización del autor
http://repositorio.uancv.edu.pe/

TESIS UANCV
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN
"OFICINA DE INVESTIGACIÓN"

JORGE RAUL ZONA CASSA

FITORREMEDIACIÓN DE PLOMO, CADMIO Y COBRE EN SUELOS ALEDAÑOS AL BOTADERO DE CANCHARANI MEDIAN...

Trabajos de tesis para ingreso a repositorio

Detalles del documento

Identificador de la entrega
trn:oid:::13016:604078914

Fecha de entrega
1 jul 2026, 16:12 GMT-5

Fecha de descarga
2 jul 2026, 21:38 GMT-5

Nombre del archivo
T036_75263035_T.docx

Tamaño del archivo
34.6 MB

158 páginas

26.337 palabras

146.476 caracteres

OFICINA DE INVESTIGACIÓN
Tesis Publicada con autorización del autor
http://repositorio.uancv.edu.pe/

TESIS UANCV

VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN
"OFICINA DE INVESTIGACIÓN"

14% Similitud general

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

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

Fuentes principales

8% Fuentes de Internet
2% Publicaciones
11% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

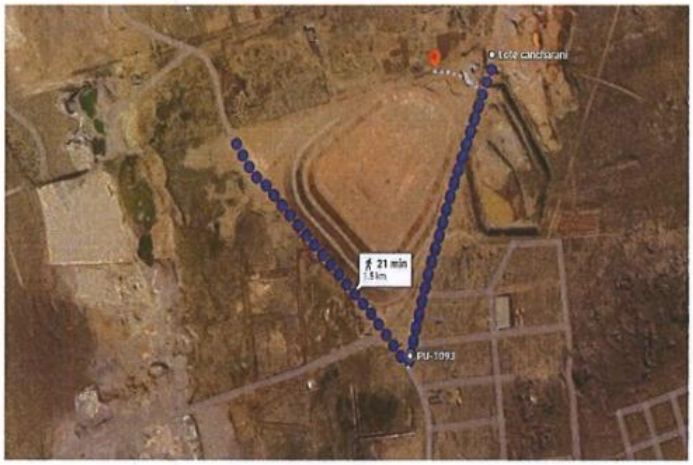
Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

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

OFICINA DE INVESTIGACIÓN
Tesis Publicada con autorización del autor
http://repositorio.uancv.edu.pe/

Metadatos complementarios

TÍTULO DE LA TESIS	
FITORREMEDIACIÓN DE PLOMO, CADMIO Y COBRE EN SUELOS ALEDAÑOS AL BOTADERO DE CANCHARANI MEDIANTE STIPA ICHU Y FESTUCA DOLICHOPHYLLA PUNO 2025	
Datos de autor	
Nombres y apellidos	JORGE RAUL ZONA CASSA
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	75263035
URL de ORCID	https://orcid.org/0009-0006-2235-2738
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	ADWAR RANULFO SANCHEZ CARREON
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	02064066
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0001-8065-6533
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	OSCAR VICENTE VIAMONTE CALLA
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	02371550
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	FRANZ JOSEPH BARAHONA PERALES
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	02442876
Miembro del jurado 2	
Nombres y apellidos	JESÚS ESTEBAN CASTILLO MACHACA
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	01323821

Datos de investigación	
Línea de investigación	SANEAMIENTO AMBIENTAL - P22
Grupo de investigación	No aplica.
Agencia de financiamiento	Sin financiamiento.
Ubicación geográfica de la investigación	País: Perú Departamento: Puno Provincia: Puno Distrito: Puno Coordenadas: Latitud: -15.0149808 Longitud: -70.3652901 https://maps.app.goo.gl/Md7eUkerZ3hCftCr5 
Año o rango de años en que se realizó la investigación	Septiembre 2025 – Diciembre 2025
URL de disciplinas OCDE https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.02.04	**Ingeniería ambiental** https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.07.00 **Ingeniería ambiental y geológica** https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.07.01



TESIS UANCV
TESIS UANCV
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN
"OFICINA DE INVESTIGACIÓN"

DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD Y RESPONSABILIDAD

Yo JORGE RAUL ZONA CASSA, identificado con DNI Nro. 75263035 en mi condición de egresado de:

☒ **Escuela Profesional**

☐ **Programa de Segunda Especialidad,**

☐ **Programa de Maestría o Doctorado**

INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL,

informo que he elaborado el/la ☒ **Tesis** o ☐ **Trabajo de Investigación,** ☐ **Trabajo Académico** denominada:

FITORREMEDIACIÓN DE PLOMO, CADMIO Y COBRE EN SUELOS ALEDAÑOS AL BOTADERO DE CANCHARANI MEDIANTE STIPA ICHU Y FESTUCA DOLICHOPHYLLA PUNO 2025

Asesorado por: Ing. ADWAR RANULFO SANCHEZ CARREON

Es un tema original.

Declaro que el presente trabajo de tesis es elaborado por mi persona y **no existe plagio/copia** de ninguna naturaleza, en especial de otro documento de investigación (tesis, revista, texto, congreso, o similar) presentado por persona natural o jurídica alguna ante instituciones académicas, profesionales, de investigación o similares, en el país o en el extranjero.

Dejo constancia que las citas de otros autores han sido debidamente identificadas en el trabajo de investigación, por lo que no asumiré como suyas las opiniones vertidas por terceros, ya sea de fuentes encontradas en medios escritos, digitales o Internet.

Asimismo, ratifico que soy plenamente consciente de todo el contenido de la tesis y asumo la responsabilidad de cualquier error u omisión en el documento, así como de las connotaciones éticas y legales involucradas.

El incumplimiento de lo declarado da lugar a responsabilidad del declarante, en consecuencia; a través del presente documento asumo frente a terceros, la Universidad Andina Néstor Cáceres Velásquez y/o la Administración Pública toda responsabilidad que pueda derivarse por el trabajo final presentado. Lo señalado incluye responsabilidad pecuniaria incluido el pago de multas u otros por los daños y perjuicios que se ocasionen.

Juliaca 28 de ABRIL del 2026

Firma del Asesor
(obligatoria)

FIRMA (obligatoria)

Huella

OFICINA DE INVESTIGACIÓN
Tesis Publicada con autorización del autor
http://repositorio.uancv.edu.pe/
OFICINA DE INVESTIGACIÓN
Tesis Publicada con autorización del autor
http://repositorio.uancv.edu.pe/

TESIS UANCV
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN
"OFICINA DE INVESTIGACIÓN"

DEDICATORIA

Ante todo, dirijo esta tesis a Dios, como agradecimiento por el don de la existencia, por la entereza y la clarividencia que me permitieron coronar este logro.

A mis progenitores, por su afecto desinteresado, sus innumerables desvelos y por inculcarme que la tenacidad conduce inevitablemente al éxito.

A mi familia, por ser mi inspiración constante y el motor que me impulsó a no rendirme.

Jorge Raul Zona Cassa

OFICINA DE INVESTIGACIÓN
Tesis Publicada con autorización del autor
http://repositorio.uancv.edu.pe/

TESIS UANCV
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN
"OFICINA DE INVESTIGACIÓN"

AGRADECIMIENTO

Manifiesto mi sincero agradecimiento a la UANCV, por su acogida en sus aulas y brindarme un espacio de aprendizaje donde consolidé mis conocimientos y fortalecí mi vocación profesional.

A la FICP, EPISA, por fomentar en mí el espíritu crítico, la responsabilidad y el adeudo con el bien ambiental y social.

Deseo hacer un reconocimiento a mis profesores, por su entrega y por transmitir sus conocimientos y sapiencia, lo cual enriqueció de manera fundamental mi preparación. De igual modo, agradezco a los integrantes del tribunal de tesis, por sus pertinentes observaciones y contribuciones.

De manera especial, expreso mi reconocimiento a mi asesor de tesis, por su constante acompañamiento, orientación y apoyo en el desarrollo de esta investigación.

A mi grupo familiar, por su afecto, apoyo incondicional y por haberme transmitido la importancia del trabajo constante y la resiliencia. A mi círculo de amistades, por su constante presencia, motivación y por convertir este período de mi vida en una experiencia inolvidable.

Jorge Raul Zona Cassa

OFICINA DE INVESTIGACIÓN
Tesis Publicada con autorización del autor
http://repositorio.uancv.edu.pe/

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA.....i

AGRADECIMIENTO ii

ÍNDICE GENERAL.....iii

ÍNDICE DE TABLAS viii

ÍNDICE DE FIGURAS x

RESUMEN xii

ABSTRACT.....xiii

INTRODUCCIÓN xiv

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Análisis de la situación problemática. 15

1.2. Planteamiento del problema. 17

1.2.1. Problema general 17

1.2.2. Problemas específicos 17

1.3. Objetivos de la investigación 18

1.3.1. Objetivo general 18

1.3.2. Objetivos específicos..... 18

1.4. Justificación de la investigación..... 18

1.4.1. Justificación Practica 18

1.4.2. Justificación social 19

1.4.3. Justificación ambiental 20

1.4.4. Justificación Económica 21

1.5. Hipótesis de la investigación 21

1.5.1. Hipótesis general 21

1.5.2. Hipótesis especifica 22

1.6. Variable de la investigación 22

1.6.1. Variable de caracterización 22

1.6.2. Variable de interés 22

1.7. Operacionalización de variables 23

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la investigación 24

2.1.1. Antecedentes internacionales 24

2.1.2. Antecedentes nacionales 26

2.1.3. Antecedentes regionales 35

2.2. Bases teóricas 40

2.2.1. Fitorremediación 40

2.2.2. Enmiendas orgánicas 48

2.2.3. Stipa Ichu 48

2.2.4. Festuca dolichopthylla 51

TESIS UANCV
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN
"OFICINA DE INVESTIGACIÓN"

2.2.5. Metales pesados en el suelo 52

2.2.6. Suelos con metales pesados producto de lixiviados 59

2.2.7. Impacto de los residuos sólidos en el suelo 63

2.2.8. Estándar de calidad ambiental 66

2.3. Marco conceptual 68

2.3.1. Suelo 68

2.3.2. Suelo contaminado 68

2.3.3. Disposición final de residuos sólidos 68

2.3.4. Metales pesados 68

2.3.5. Plomo 69

2.3.6. Cobre 69

2.3.7. Cadmio 69

2.3.8. pH 70

2.3.9. Conductividad eléctrica 70

2.3.10. Remoción 70

2.3.11. Fitorremediación 71

2.3.12. Humus de lombriz 71

2.3.13. Enmiendas orgánicas 71

CAPITULO III

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. Diseño de investigación 71

OFICINA DE INVESTIGACIÓN
Tesis Publicada con autorización del autor
http://repositorio.uancv.edu.pe/

3.2. Tipo de investigación 73

3.3. Nivel de investigación 73

3.4. Enfoque de investigación 73

3.5. Diseño estadístico 74

3.6. Población y muestra 74

3.6.1. Población 74

3.6.2. Muestra 74

3.7. Materiales y equipos 75

3.8. Técnicas e instrumentos 75

3.8.1. Técnicas 76

3.8.2. Instrumentos 76

3.9. Lugar de estudio 77

3.10. Procedimiento metodológico 79

3.10.1. Procedimiento para el objetivo específico 1: Caracterizar los suelos aledaños al botadero de Cancharani en términos de pH, conductividad eléctrica y concentración inicial de Pb, Cd y Cu. 79

3.10.2. Procedimiento para el objetivo específico 2: Implementar ensayos de fitorremediación bajo condiciones controladas utilizando Stipa ichu y Festuca dolichophylla con y sin adición de Humus. 83

3.10.3. Procedimiento para el objetivo específico 3: Determinar la eficiencia de remoción de Pb, Cd y Cu en el suelo por efecto de cada especie y tratamiento 90

TESIS UANCV
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN
"OFICINA DE INVESTIGACIÓN"

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Resultados 92

4.1.1. Caracterizar los suelos aledaños al botadero de Cancharani en términos de pH, conductividad eléctrica y concentración inicial de Pb, Cd y Cu. 92

4.1.2. Implementar ensayos de fitorremediación bajo condiciones controladas utilizando Stipa ichu y Festuca dolichophylla con y sin adición de Humus. 101

4.1.3. Determinar la eficiencia de remoción de Pb, Cd y Cu en el suelo por efecto de cada especie y tratamiento 109

4.2. Discusiones 119

CONCLUSIONES 125

RECOMENDACIONES 127

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 129

ANEXOS 138

OFICINA DE INVESTIGACIÓN
Tesis Publicada con autorización del autor
http://repositorio.uancv.edu.pe/

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Operacionalización de variables de la presente investigación. 23

Tabla 2 Factor de Translocación (FT)..... 46

Tabla 3 Taxonomía de la especie Stipa ichu. 49

Tabla 4 Estándares de Calidad Ambiental para Suelo del Ministerio de Ambiente. 67

Tabla 5 Estándares de Calidad Ambiental para el Suelo – Perú y los Soil Quality Guidelines for the Protection of Environmental. 67

Tabla 6 Coordenadas del lugar de estudio – Ubicación del botadero Cancharani en el distrito de Puno. 77

Tabla 7 Diseño de experimental de los ensayos de fitorremediación. 85

Tabla 8 Resultado de pH y conductividad del suelo aledaño al botadero de Cancharani, Puno – 2025. 93

Tabla 9 Resultado de la concentración de Plomo..... 96

Tabla 10 Resultado de la concentración de Cadmio. 97

Tabla 11 Resultado de la concentración de Cobre (Cu) en los suelos. 99

Tabla 12 Concentraciones totales iniciales de metales en suelo (mg/kg) promedio y comparación con standard MINAM (ECA suelo). 100

Tabla 13 Crecimiento promedio y biomasa seca final por tratamiento 102

Tabla 14 Resultados de los parámetros de Inorgánicos (Pb, Cd y Cu) de muestras de suelo de los tratamientos del diseño experimental de fitorremediación con especies de Stipa ichu y Festuca dolichophylla. 103

TESIS UANCV
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN
"OFICINA DE INVESTIGACIÓN"

Tabla 15 Eficiencia de remoción de Pb, Cd y Cu en el suelo por efecto de cada especie y tratamiento. 109

Tabla 16 Resultados del porcentaje de remoción para el día 30 y 60 de (Pb, Cd y Cu) de muestras de suelo de los tratamientos del diseño experimental de fitorremediación con especies de Stipa ichu y Festuca dolichophylla. 114

OFICINA DE INVESTIGACIÓN
Tesis Publicada con autorización del autor
http://repositorio.uancv.edu.pe/

TESIS UANCV
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN
"OFICINA DE INVESTIGACIÓN"

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Fitoextracción para la remoción de metales pesados. 41

Figura 2 Fito estabilización para la remoción de metales pesados 42

Figura 3 Fito volatilización para la remoción de metales pesados 43

Figura 4 Rizo filtración para la remoción de metales pesados. 44

Figura 5 Se muestra la especie Stipa Ichu. 51

Figura 6 Se muestra la especie Festuca dolichopthylla. 52

Figura 7 Ubicación de los puntos de muestreo del botadero Cancharani. 78

Figura 8 Delimitación y señalización del área de muestreo de suelo aledaño al botadero de Cancharani, Puno – 2025. 80

Figura 9 Extracción de muestra de suelo a 40 cm de profundidad en el área aledaña al botadero de Cancharani, Puno – 2025. 81

Figura 10 Recolección y almacenamiento de muestras de suelo para su traslado al laboratorio LAQUAMEQ E.I.R.L., Puno – 2025. 82

Figura 11 Proceso de preparación de la muestra de suelo de los ensayos para la fitorremediación. 86

Figura 12 Proceso de preparación de Humus y mezclado con la muestra de suelo. 87

Figura 13 Proceso de trasplantación de plántulas sanas y uniformes de Stipa ichu y Festuca dolichophylla. 88

Figura 14 Proceso de monitoreo y riego de las plantas de estas dos especies. 88

Figura 15 Proceso de recolección de la muestra de cada ensayo y según cada especie de fitorremediación. 89

Figura 16 Variación del pH del suelo por punto de muestreo. 94

OFICINA DE INVESTIGACIÓN
Tesis Publicada con autorización del autor
http://repositorio.uancv.edu.pe/

Figura 17 Conductividad eléctrica (µS/cm) por punto de muestreo. 95

Figura 18 Concentración de Plomo (Pb) en suelos del botadero y ECA-Suelo. ... 96

Figura 19 Concentración de Cadmio (Cd) en suelos del botadero y ECA-Suelo. . 98

Figura 20 Concentración de Cobre (Cu) en suelos del botadero y ECA-Suelo..... 99

Figura 21 Evolución temporal de plomo (Pb) en suelo. 106

Figura 22 Evolución temporal de Cadmio (Cd) en suelo. 107

Figura 23 Evolución temporal de cobre (Cu) en suelo. 108

Figura 24 Remoción de la concentración de Pb en suelos tratados por tratamiento. 111

Figura 25 Remoción de la concentración de Cadmio (Cd) en suelos tratados por tratamiento. 112

Figura 26 Distribución de la eficiencia de remoción (%) de cobre (Cu) en suelos tratados por tratamiento. 113

Figura 27 Distribución de la eficiencia de remoción (%) de Plomo (Pb) en suelos tratados. 116

Figura 28 Distribución de la eficiencia de remoción (%) de Cadmio (Cd) en suelos tratados. 117

Figura 29 Distribución de la eficiencia de remoción (%) de Cu en suelos tratados.. 118

RESUMEN

El actual estudio poseyó como propósito general valorar la capacidad fitorremediadora de las especies nativas Festuca dolichophylla y Stipa ichu en la atenuación de metales pesados (Pb, Cu y Cd) presentes en superficies aledaños al vertedero de Cancharani, Puno – 2025. La metodología aplicada fue de tipo aplicada, con diseño experimental, con un enfoque cuantitativo y un nivel explicativo-experimental. El ensayo se realizó en macetas durante un periodo de 60 días, comprendidos entre el 12 de septiembre al 12 de noviembre de 2025, utilizando 14 unidades experimentales (baldes de 20 L) distribuidos de la siguiente manera: 3 baldes con Stipa ichu sin humus, 3 baldes con Stipa ichu con humus de lombriz al 10%, 3 baldes con Festuca dolichophylla sin humus, 3 baldes con Festuca dolichophylla con humus al 10% y 2 controles sin planta (uno con humus y otro sin humus). Los resultados en los tratamientos sin enmienda (T0), Festuca dolichophylla presentó remociones de 19.37 % para Pb, 18.75 % para Cd y 16.67 % para Cu, mientras que Stipa ichu alcanzó 26.34 %, 17.55 % y 22.90 %, respectivamente. En cambio, con la adición de humus (T1), Festuca dolichophylla obtuvo las mayores eficiencias de remoción: 59.06 % (Pb), 52.08 % (Cd) y 62.02 % (Cu), reduciendo las concentraciones finales a 33.2 mg/kg de Pb, 0.92 mg/kg de Cd y 49 mg/kg de Cu, valores inferiores a los ECA del Perú. Por su parte, Stipa ichu alcanzó 51.97 %, 49.74 % y 55.38 %, confirmando su potencial complementario en la fitoestabilización del suelo. En conclusión, la formulación óptima corresponde a la combinación de Festuca dolichophylla con 10 % de humus al día 60.

Palabras claves: fitorremediación, Stipa ichu, Festuca dolichophylla, humus, suelos contaminados, fitoestabilización, fitoextracción.

ABSTRACT

The overall objective of this study was to assess the phytoremediation capacity of the native species Festuca dolichophylla and Stipa ichu in mitigating heavy metals (Pb, Cu, and Cd) present in areas surrounding the Cancharani landfill in Puno – 2025. The methodology applied was applied, with an experimental design, a quantitative approach, and an explanatory-experimental level. The trial was conducted in pots over a period of 60 days, from September 12 to November 12, 2025, using 14 experimental units (20 L buckets) distributed as follows: 3 buckets with Stipa ichu without humus, 3 buckets with Stipa ichu with 10% worm humus, 3 buckets with Festuca dolichophylla without humus, 3 buckets with Festuca dolichophylla with 10% humus, and 2 controls without plants (one with humus and one without humus). The results in the treatments without amendment (T0) showed that Festuca dolichophylla removed 19.37% of Pb, 18.75% of Cd, and 16.67% of Cu, while Stipa ichu removed 26.34%, 17.55%, and 22.90%, respectively. In contrast, with the addition of humus (T1), Festuca dolichophylla achieved the highest removal efficiencies: 59.06% (Pb), 52.08% (Cd), and 62.02% (Cu), reducing the final concentrations to 33.2 mg/kg of Pb, 0.92 mg/kg of Cd, and 49 mg/kg of Cu, values lower than the MCLs in Peru. Stipa ichu achieved 51.97%, 49.74% and 55.38%, confirming its complementary potential in soil phytostabilization. In conclusion, the optimal formulation corresponds to the combination of Festuca dolichophylla with 10% humus on day 60.

Keywords: phytoremediation, Stipa ichu, Festuca dolichophylla, humus, contaminated soils, phytostabilization, phytoextraction.

INTRODUCCIÓN

La polución de superficies por metales solidos forma una problemática ambiental de gran magnitud a causa de su persistencia, toxicidad y potencial de bioacumulación en los ecosistemas terrestres y marítimos (Acharya, et al., 2025). Por ejemplo, los metales como Cd, Pb y Cu son considerados elementos que, aunque algunos tienen funciones biológicas en pequeñas cantidades, cuando se encuentran en concentraciones elevadas pueden alterar procesos fisiológicos de las plantas, degradar la condición de la superficie y representar riesgos para la salubridad humana (Rohit, Ranjan , & Prodyut , 2022).

La presencia de vertederos, botaderos o depósitos de residuos en zonas periurbanas o rurales, como el caso del botadero de Cancharani, Puno, frecuentemente se coliga con la liberación de metales solidos hacia el entorno de la superficie y del agua, en parte por lixiviación, erosión o dispersión atmosférica (Gautam, Ram Paudel , & Devkota, 2025). Estos metales no se degradan en el medio ambiente y pueden movilizarse, incorporarse a la cadena trófica y afectar tanto la condición de la superficie como la salubridad pública.

En tal sentido, la fitorremediación aparece como una disyuntiva ecológica, sostenible y de coste relativamente bajo frente a los métodos habituales de limpieza de suelos contaminados, los cuales suelen ser invasivos, caros y con efectos secundarios indeseados (Yan, et al., 2020). La selección de especies vegetales adaptadas al sitio contaminado, con buen sistema radicular, tolerancia al metal y capacidad de acumulación es crítico para el triunfo de un proyecto de fitorremediación (Yan, et al., 2020). Para el caso del altiplano peruano, géneros nativas como Stipa ichu y Festuca dolichophylla ofrecen ventajas ecológicas:

adaptabilidad al clima alto andino, raíces profundas, potencial de cobertura del suelo y posible uso en recuperación de suelos alterados. (Acharya, et al., 2025)

Dado este escenario, el actual análisis se plantea como propósito valorar la cabida fitorremediadora de las familias nativas Festuca dolichophylla y Stipa ichu en la atenuación de metales solidos (Cd, Pb y Cu) presentes en superficies limítrofes al veredero de Cancharani, Puno. Este enfoque permite vincular prácticas de restauración ecológica con la gestión local de suelos degradados, en un contexto andino que requiere soluciones específicas.

El actual estudio se organiza en 4 capítulos. El **Capítulo I** presenta el planteamiento de la problemática, incluyendo el estudio de la situación, preguntas de investigación, objetivos, justificación, variables e hipótesis. El **Capítulo II** aborda el marco teórico, bases teóricas, con antecedentes y el marco conceptual. El **Capítulo III** describe la metodología, especificando el tipo, diseño, nivel y enfoque de análisis, instrumentos y técnicas, lugar de estudio, población, muestra y procedimientos de compilación y análisis de datos. El **Capítulo IV** expone los hallazgos y su discusión, fundados por objetivos específicos, con tablas y figuras acompañadas de interpretación y cotejo con análisis anteriores. Posteriormente, se presenta las conclusiones basadas de acuerdo a los objetivos y recomendaciones orientadas a futuras investigaciones.

TESIS UANCV
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN
"OFICINA DE INVESTIGACIÓN"

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Análisis de la situación problemática.

A nivel internacional, la acumulación de restos sólidos urbanos es una de las primordiales fuentes de polución de la superficie a nivel mundial. Conforme con el Banco Mundial (2022), cada año se generan alrededor de 2.010 millones de tonelaje de restos sólidos urbanos, y se proyecta que este número acreciente a 3.400 millones de tonelaje para el año 2050. La disposición inadecuada de estos restos en vertederos a cielo abierto ocasiona la emancipación de metales solidos como Pb, Cd y Cu, los cuales pueden incorporarse en las superficies y aguas acuíferas, afectando los ecosistemas y la salubridad humana FAO (2018). En diversos países de América Latina, más del 45 % de los residuos son depositados en vertederos informales o sin control ambiental, lo que empeora las problemáticas de polución y dificulta la recuperación de suelos degradados (ONU Medio Ambiente, 2020).

En la realidad del Perú, la administración de los desechos sólidos representa uno de los mayores retos en materia ecológica. De acuerdo con información proporcionada por el MINAM (2023), el país genera más de 23.000 tonelajes cotidianas de restos sólidos, de los cuales solo el 53 % se dispone en

OFICINA DE INVESTIGACIÓN
Tesis Publicada con autorización del autor
http://repositorio.uancv.edu.pe/

rellenos sanitarios con control técnico; el resto se acumula en botaderos informales. Según, Tarrillo, et al., (2025), existen más de 1.500 botaderos a nivel nacional, donde los residuos son arrojados sin

medidas de impermeabilización ni control de lixiviados, provocando la polución de la superficie y del H2O MINAM (2023). Este escenario nacional refuerza la necesidad de efectuar tecnologías de remediaciones ambientales, como la fitorremediación, adaptadas al contexto local peruano.

La región de Puno enfrenta serios problemas ambientales derivados de la habilidad inadecuada de restos sólidos. Como el MINAM (2022), en Puno se crean alrededor de 500 tonelajes diarias de restos, de los cuales más del 70 % se depositan en vertederos a cielo abierto. Estos sitios carecen de sistemas de drenaje y tratamiento de lixiviados, permitiendo que las poluciones se filtren hacia el suelo y las aguas acuíferas. en zonas aledañas a botaderos del altiplano puneño se han encontrado altos niveles de concentraciones de plomo y cobre, valores que sobrepasan los límites sugeridos para superficies agrícolas - ECA-Suelo del (MINAM, 2022).

En Puno, y más concretamente en la zona del vertedero de Cancharani, la problemática es aún más clara y localizada: un estudio efectuado determinó que las reuniones de los metales solidos Pb, Cd y Cu en las superficies del vertedero de Cancharani que exceden los LMP Torres Quispe (2018), Otro estudio también señala que el botadero de Cancharani, recibe aproximadamente 90 toneladas diarias de residuos sólidos sin tratamiento ni aislamiento adecuado Municipalidad Provincial de Puno (2023). De acuerdo con Torres Quispe (2018), los valores promedio de metales en nueve puntos de muestra fueron Pb = 56,36

mg/kg, Cd = 0,73 mg/kg y Cu = 45,20 mg/kg, niveles que, aunque no exceden los límites del ECA-Suelo, reflejan una acumulación sostenida que amenaza la condición de la superficie y los ecosistemas locales.

Ante esta problemática, la fitorremediación con especies altoandinas como Festuca dolichophylla y Stipa ichu se traza como una opción sostenible para recuperar superficies polucionados por metales sólidos, aprovechando su resistencia y capacidad de absorción.

1.2. Planteamiento del problema.

1.2.1. Problema general

¿Cuál es la capacidad fitorremediadora de las especies nativas Stipa ichu y Festuca dolichophylla en la atenuación de metales pesados (Pb, Cd y Cu) presentes en suelos aledaños al botadero de Cancharani, Puno – 2025?

1.2.2. Problemas específicos

a) ¿Cuáles son las características los suelos aledaños al botadero de Cancharani en términos de pH, conductividad eléctrica y concentración inicial de Pb, Cd y Cu?
b) ¿Cómo se comportan las especies nativas Stipa ichu y Festuca dolichophylla en ensayos de fitorremediación bajo condiciones controladas, con y sin la adición de humus de lombriz?
c) ¿Cuál es la eficiencia de remoción de Pb, Cd y Cu en el suelo por efecto de cada especie y tratamiento?

1.3. Objetivos de la investigación

1.3.1. Objetivo general

Evaluar la capacidad fitorremediadora de las especies nativas Stipa ichu y Festuca dolichophylla en la atenuación de metales pesados (Pb, Cd y Cu) presentes en suelos aledaños al botadero de Cancharani, Puno – 2025.

1.3.2. Objetivos específicos

a) Caracterizar los suelos aledaños al botadero de Cancharani en términos de pH, conductividad eléctrica y concentración inicial de Pb, Cd y Cu.
b) Implementar ensayos de fitorremediación bajo condiciones controladas utilizando Stipa ichu y Festuca dolichophylla con y sin adición de Humus.
c) Determinar la eficiencia de remoción de Pb, Cd y Cu en el suelo por efecto de cada especie y tratamiento.

1.4. Justificación de la investigación

1.4.1. Justificación Practica

La aplicación de técnicas de fitorremediación en superficies contaminados representa una alternativa práctica y sustentable frente a las sistemáticas convencionales de remediaciones físico-químicas, los cuales pavimenten ser dispendiosos y generar impactos secundarios sobre el ambiente (García & Ramírez, 2019). En el caso de las superficies aledañas al vertedero de Cancharani, el uso de especies vegetales nativas como Stipa ichu y Festuca dolichophylla permite aprovechar su adaptación natural a las condiciones climáticas del altiplano, su bajo requerimiento de mantenimiento y su cabida para

acopiar o inmovilizar metales sólidos (Cadillo, 2020). De esta manera, la investigación ofrece una elección viable y económica para la rehabilitación de superficies degradados, reduciendo la movilidad de los metales y disminuyendo los riesgos ambientales y sanitarios asociados.

Asimismo, la agregación de humus de lombriz como rectificación orgánica perfecciona la estructura y fertilidad de la superficie, promueve el crecimiento vegetal y potencia los procesos de fitoestabilización y fitoextracción (López, Torres, & Vega, 2021). La combinación de estas especies altoandinas con humus constituye una estrategia práctica para implementar proyectos de recuperación ambiental en zonas afectadas por botaderos o pasivos contaminantes, generando beneficios directos para la comunidad y las autoridades locales al facilitar la transferencia tecnológica y el manejo sostenible de suelos contaminados. En conjunto, los resultados de este estudio pueden valer como centro para expectantes acciones de restauración ecológica en Puno y otras áreas con problemáticas análogos.

1.4.2. Justificación social

La polución de la superficie por restos sólidos con existencia de metales solidos personifica un peligro para la salubridad de las urbes cercanas y para la seguridad alimentaria, al afectar suelos agrícolas o de pastoreo. Al implementar un estudio dirigido al botadero de Cancharani que afecta al distrito de Puno se genera un beneficio directo para la comunidad local al mejorar potencialmente la calidad del suelo, reducir la exposición a metales tóxicos y recuperar áreas degradadas para usos productivos. Además, al evaluar la efectividad de las especies nativas, se promueve el involucramiento de la población local y el

conocimiento tradicional (ecología andina) en la gestión ambiental. Esto responde a una necesidad de inclusión social y desarrollo sostenible en zonas altoandinas. En estudios de remediaciones de superficies con metales solidos se ha destacado la importancia del componente comunitario y la repercusión social de recuperar territorios degradados. Así, la investigación no sólo aporta al conocimiento técnico, sino que fortalece la gobernanza ambiental, la educación local y la colaboración de la colectividad, lo que es esencial para sostenibilidades del proyecto (Trelles P A & García López, 2022).

1.4.3. Justificación ambiental

El vertedero de Cancharani representa una fuente significativa de contaminación ambiental en la ciudad de Puno, a causa de la disposición impropia y prolongada de restos sólidos que han generado la acumulación de metales solidos como Pb, Cd y Cu en las superficies aledañas. Estos metales, al no degradarse naturalmente, trastornan los patrimonios fisicoquímicos de la superficie, afectan el microbiota y pueden incorporarse a la cadena trófica, constituyendo un peligro para la salubridad humana y el equilibrio ecosistémico. Ante estas problemáticas, la fitorremediación se presenta como una disyuntiva ambientalmente sostenible, económica y efectiva para el recobro de suelos contaminados, aprovechando el potencial de especies oriundas adaptadas a los contextos altoandinos (Silva Mori K. , 2024).

Bajo estas circunstancias, este estudio pretende valorar la eficacia de Festuca dolichophylla y Stipa ichu en la reducción de cadmio, plomo y cobre, tanto con cómo sin la adición de humus de lombriz como acondicionador natural. La selección de estas plantas se basa en su inherente tolerancia a factores

adversos y su predominio en los páramos altoandinos, favoreciendo así su implementación en iniciativas de rehabilitación ecológica. Los resultados del estudio aportarán evidencia científica sobre la capacidad fitorremediadora de especies locales, promoviendo el uso de técnicas biológicas para la mitigación de contaminantes y ayudando al desempeño de los propósitos de desarrollo sostenible vinculados a la gestión ambiental y la salud del suelo (Hernandez, 2022).

1.4.4. Justificación Económica

Los métodos convencionales de descontaminación de suelos, por ejemplo, la extracción y el confinamiento en rellenos sanitarios, generalmente conllevan gastos significativos, requieren maquinaria especializada y pueden generar desechos adicionales. Por el contrario, la fitorremediación ha surgido como una opción más económica, viable para terrenos de gran extensión con presencia intermedia de elementos metálicos tóxicos (Canales Farah, 2021). Al producirse resultados positivos en los ensayos con Stipa ichu y Festuca dolichophylla, se abre la posibilidad de replicar el sistema de remediación en otros botaderos o suelos contaminados en la región, reduciendo los costos de rehabilitación y promoviendo el uso productivo del terreno.

1.5. Hipótesis de la investigación

1.5.1. Hipótesis general

Las especies nativas Stipa ichu y Festuca dolichophylla presentan capacidad fitorremediadora significativa en la reducción de las concentraciones de Pb, Cd y Cu en suelos contaminados del botadero de Cancharani, siendo más eficiente el tratamiento con adición de Humus.

1.5.2. Hipótesis especifica

a) Los suelos aledaños al botadero de Cancharani presentan valores de concentraciones de Pb, Cd y Cu que superan los límites establecidos por los Estándares de Calidad Ambiental (ECA-Suelo)

b) La implementación de ensayos de fitorremediación bajo condiciones controladas utilizando Stipa ichu y Festuca dolichophylla con adición de Humus mejora la absorción y retención de Pb, Cd y Cu en comparación con los tratamientos sin Humus.

c) La eficiencia de remoción de Pb, Cd y Cu varía entre Stipa ichu y Festuca dolichophylla, siendo una de las especies más eficiente en la acumulación y reducción de metales pesados en el suelo.

1.6. Variable de la investigación

1.6.1. Variable de caracterización

- Especies vegetales utilizadas en la fitorremediación (Stipa ichu y Festuca dolichophylla).

1.6.2. Variable de interés

- Concentración de metales pesados (Pb, Cd y Cu) en el suelo.

1.7. Operacionalización de variables

Tabla 1

Operacionalización de variables de la presente investigación.

Variables	Dimensiones	Indicadores	Unidad	Instrumentos / técnica
Variable Independiente: Especies vegetales (Stipa ichu, Festuca dolichophylla).	Tipo de especie vegetal	Identificación de especie (Stipa ichu, Festuca dolichophylla)	Categórica	Guía botánica; registro fotográfico; identificación taxonómica
	Presencia o ausencia de Humus	Porcentaje de Humus añadido al suelo	%	Balanza digital; recipiente de mezcla; registro experimental
	Crecimiento y desarrollo vegetal	Altura de planta (cm), número de macollos, masa seca (g)	cm, g	Regla milimétrica, estufa de secado, balanza analítica
Variable Dependiente: Concentración de metales pesados (Pb, Cd, Cu) en el suelo.	Concentración de Pb, Cd y Cu antes del ensayo	Pb, Cd, Cu (mg/kg)	mg/kg	Laboratorio
	Concentración de Pb, Cd y Cu después del ensayo	Pb, Cd, Cu (mg/kg)	mg/kg	Laboratorio
	Porcentaje de reducción de metales en suelo	Pb, Cd, Cu	%	ECA – Instrumentos de calidad ambiental

TESIS UANCV
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN
"OFICINA DE INVESTIGACIÓN"

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la investigación

2.1.1. Antecedentes internacionales

El estudio de Abderrafa et al. (2025), denominado “Avances en fitorremediación: una revisión de las enmiendas del suelo para el manejo de la polución por metales solidos”, tuvo como objetivo general analizar de manera crítica el uso de distintas enmiendas del suelo como biochar, Humus, exudados vegetales y agentes microbianos para potenciar las fitorremediaciones de superficies polucionadas con metales sólidas, valorando su efectividad, sostenibilidad y aplicabilidad a gran escala. El método aplicado residió en un análisis bibliométrico de estudios publicados entre 2014 y 2024, empleando el software VOSviewer y la base de datos Scopus (v1.6.20) para construir mapas de coocurrencia de palabras clave, redes de colaboración y tendencias de investigación. Los instrumentos y técnicas incluyeron la revisión metodología de literatura científica, el análisis de co-citación y la interpretación de mecanismos de acción físico-químicos y biológicos de las enmiendas. Los hallazgos del análisis enseñaron un acrecentamiento significativo de publicaciones a partir del

OFICINA DE INVESTIGACIÓN
Tesis Publicada con autorización del autor
http://repositorio.uancv.edu.pe/

año 2017, con China como país líder en producción científica, seguido de Estados Unidos, Pakistán y Australia. Las palabras clave más frecuentes fueron phytoremediation, biochar, heavy metals y soil amendments. Se halló que el biochar perfecciona la cabida de cambio catiónico, retiene metales como Pb, Cd y As, y promueve el crecimiento vegetal; el Humus y vermiHumus incrementan la fertilidad del superficie, favorecen la diligencia microbiana y reducen la fitotoxicidad; los agentes microbianos como PGPR y hongos micorrízicos aumentan el aguante de las plantas a metales y facilitan su absorción controlada; mientras que los exudados vegetales modifican la biodisponibilidad de metales y mejoran la eficiencia de fitoextracción. Además, se identificaron vacíos de investigación relacionados con la falta de estudios de campo, la evaluación de efectos a largo plazo y la variabilidad de resultados según condiciones edáficas y climáticas. En terminación, la fitorremediación asistida con enmiendas del suelo se muestra como una tecnología limpia, económica y prometedora para restaurar suelos contaminados, aunque requiere más estudios experimentales y de modelación que garanticen su eficacia, seguridad y escalabilidad.

El estudio de Steliga y Dorota (2020), titulada “Aplicación de Festuca arundinacea en las fitorremediaciones de superficies polucionados con Pb, Ni, Cd e hidrocarburos de petróleo”; tuvo como propósito valorar la efectividad de Festuca arundinacea en la eliminación de metales solidos (Pb, Ni y Cd) y la biorremediación de TPH en suelos contaminados, determinando los niveles de reducción de contaminantes y la respuesta fisiológica de la especie bajo condiciones de fertilización complementaria. El método aplicado fue de tipo aplicada, con un diseño de estudio fue experimental, el estudio se desarrolló mediante ensayos de fitorremediación asistida por fertilización en condiciones

controladas durante un periodo de seis meses. Se esgrimieron superficies polucionados con desemejantes reuniones y tipos de contaminantes (metales sólidos y TPH), en los que se establecieron plantas de Festuca arundinacea. Obteniendo los siguientes resultados: Después de seis meses de tratamiento, los porcentajes de reducción de contaminantes fueron los siguientes: Pb (25.4–34.1%), Cd (26.3–46.7%), Ni (18.7–23.8%) y TPH (49.4–60.1%). La biodegradación de TPH se atribuyó principalmente a la actividad microbiana estimulada por la fertilización, mientras que la fitorremediación aportó un aumento adicional del 17.4–23.1% en la degradación total. Los mayores descensos se registraron en los hidrocarburos del rango C12–C18 (45.6–55.5%), y los menores en C25–C36 (9.1–17.4%). Los factores de translocación (FT) fueron menores que 1, con valores entre 0.46–0.53 para Pb, 0.29–0.33 para Ni y 0.21–0.25 para Cd, lo que indica que los metales se acumularon principalmente en las raíces. Concluyendo que los resultados demuestran que Festuca arundinacea posee una elevada cabida para reducir la concentración de metales sólidos y compuestos de hidrocarburos en suelos polucionados, actuando principalmente por medio de fitoestabilización y estimulación de la biodegradación microbiana. Por lo tanto, la fitorremediación asistida con Festuca arundinacea se presenta como una disyuntiva ecológica, eficiente y sustentable para la recobro de suelos contaminados con mezclas de metales y compuestos orgánicos derivados del petróleo.

2.1.2. Antecedentes nacionales

El análisis de Martínez et al. (2021) denominación “Flora autóctona con capacidad para la despolución de suelos de altura afectados por desechos de la industria minera”, este estudio se planteó como meta principal detectar y

describir plantas autóctonas resistentes a elementos metálicos, con el fin de valorar su idoneidad para programas de biorremediación en superficies de gran altitud impactados por desechos mineros. El estudio se desarrolló en la zona de depósito de residuos de la compañía minera El Madrigal, ubicada en Caylloma, Arequipa, a 3400 metros sobre el nivel del mar, estableciéndose cinco sectores de muestreo (Primera, A, B, C y D). Las concentraciones de poluciones fueron determinadas por medio de espectrometría de manifestación atómica por plasma conectado inductivamente (ICP-AES), mientras que la identificación botánica se realizó con base en el sistema APG IV. Los resultados evidenciaron la presencia de 16 especies vegetales pertenecientes a siete familias, destacando Baccharis sp., Cortaderia jubata, Stipa ichu, Eragrostis nigricans y Juncus sp. por su alta aguante y abundancia en suelos con reuniones eminentes de arsénico (307 mg/kg), mercurio (42.8 mg/kg), bario (15893 mg/kg), cadmio (21.4 mg/kg) y plomo (628 mg/kg). superando ampliamente los ECA del Perú para superficies mineros. Pese a estos niveles tóxicos, las especies nativas registradas mostraron una alta tolerancia y adaptación ecológica, lo que demuestra su potencial en procesos de fitoestabilización natural. En particular, la especie Stipa ichu, que representó el 9.7 % de la cobertura vegetal total, demostró una notable resistencia a los efectos tóxicos de los metales sólidos y un papel relevante en la estabilización de superficies poluciondas. Se estableció que las especies Cortaderia jubata, Baccharis sp., Stipa ichu y Juncus sp. muestran una notable tolerancia a suelos con contenidos de Ba, As, Cd, Hg y Pb, constituyéndose como alternativas viables para iniciativas de biorremediación y rehabilitación ambiental en zonas altoandinas impactadas por la actividad minera.

El estudio realizado por Castro et al. (2020), titulado “Bioacumulación de Pb en las raíces y la zona aérea de pastos naturales y cultivados en zonas altamente contaminadas”, teniendo como propósito valorar la reunión y transferencia de plomo (Pb) en la capa superficial del suelo, raíces y parte sutil de pastos naturales y cultivados en zonas rurales próximas al Complejo Metalúrgico de La Oroya. Donde la metodología aplicada del estudio se desarrolló durante la temporada de lluvias de 2018 en la colectividad campesina Purísima Concepción de Paccha, ubicada a 10.2 km del complejo metalúrgico. Se compilaron 60 muestreos (suelo, raíz y parte aérea) en 20 sitios de muestreo, abarcando 1 ha de pastos naturales (principalmente Festuca dolichophylla, Bromus lanatus, Calamagrostis heterophylla) y 1 ha de pastos cultivados (Lolium perenne, Trifolium repens). Los muestreos fueron desarrollados en laboratorio bajo el método 3050B de la USEPA (SW-846) para digestión ácida, determinándose la concentración de Pb mediante espectrometría de impregnación atómica de llama (FLAA). En los hallazgos se expusieron que las concentraciones promedio de Pb en suelos fueron 210.87 a 40.37 mg/kg en pastos naturales y 224.75 a 39.41 mg/kg en pastos cultivados. En las raíces, los valores fueron de 184.37 a 52.66 mg/kg (naturales) y 169.13 a 58.79 mg/kg (cultivados), mientras que la parte aérea presentó 19.46 a 3.12 y 20.73 a 2.51 mg/kg respectivamente. El elemento de cesión del Pb de la superficie a la raíz fue 0.87 en pastos naturales y 0.75 en pastos cultivados; del suelo a la parte aérea fue 0.092 en ambos casos. Se evidenció que las raíces acopian la mayor parte del metal, limitando su movilidad hacia la parte aérea. En conclusión, el estudio demuestra una alta contaminación por Pb en los suelos y pastos de La Oroya, superando los límites máximos establecidos por normas peruanas (70

mg/kg) y europeas (60 mg/kg). Los niveles detectados en la biomasa vegetal indican un peligro significativo para la salubridad pública, pues los pastos contaminados se emplean para alimentar ganado, facilitando la transferencia del metal a la cadena alimentaria.

Según Guzmán et al. (2022) en su estudio denominado “Fitorremediación de metales solidos en pasivos mineros mediante Stipa ichu y Cortaderia nitida: una evaluación de laboratorio”, se poseyó como propósito valorar el potencial fitorremediador de ambos géneros altoandinos en superficies polucionadas por metales solidos procedentes de pasivos mineros del Perú. El estudio fue de tipo aplicada, con enfoque cuantitativo, nivel experimental y DCA, ejecutado bajo condiciones controladas de laboratorio. Se utilizaron muestras de suelo tomadas de pasivos mineros abandonados con reuniones iniciales de Fe (1420 mg/kg), Zn (365 mg/kg), Cu (210 mg/kg), Cd (2,8 mg/kg) y Cr (5.6 mg/kg), distribuidas en unidades experimentales donde se cultivaron Stipa ichu y Cortaderia nitida a lo largo de un periodo de 120 días. Acabado el ensayo, se estableció la reunión final de metales en las porciones volátiles (hojas y tallos) y en raíces, comparadas con los valores iniciales del suelo, calculándose los componentes de BAF y TF. Los hallazgos expusieron que Stipa ichu presentó mayor eficiencia de acumulación, con incrementos relativos respecto al valor inicial de Fe (278×), Zn (64×), Cu (39×) y Cd (12×), mientras que Cortaderia nitida alcanzó Fe (250×), Zn (117×), Cu (39×) y Cr (13×). Los TF fluctuaron entre 0.21 y 0.56, confirmando que Stipa ichu concentró los metales principalmente en raíces, evidenciando una predominancia del mecanismo de fitoestabilización, mientras que Cortaderia nitida mostró menor cabida de transporte de metales hacia la zona aérea. El estudio concluyó que Stipa ichu demostró un comportamiento de

hiperacumuladora eficiente, con especial afinidad por Fe, Zn y Cu, lo que respalda su potencial usanza en transmisiones de fitorremediación de superficies mineros altoandinos. Además, los autores recomiendan realizar estudios complementarios a escala de campo para cuantificar la eficacia de eliminación (%), la persistencia de metales en el suelo y la resiliencia de la vegetación, a fin de consolidar estrategias sostenibles de recuperación ambiental en zonas impactadas por pasivos mineros.

La investigación de Venegas (2016) titulada “Potencial de bioacumulación de Stipa ichu en áreas impactadas por residuos mineros de la planta de beneficio Huari – La Oroya, perteneciente a la UNCP”, este trabajo se planteó como finalidad valorar el potencial descontaminante de la especie autóctona Stipa ichu en la absorción de Pb existente en los residuos mineros generados por la planta de beneficio de Huari, en La Oroya. La investigación fue de carácter aplicado, con un enfoque cuantitativo, de nivel experimental y con un DCA, realizado a nivel de campo en suelos con altos contenidos de Pb. Se seleccionaron parcelas contaminadas con concentraciones iniciales de plomo entre 850 y 1200 mg/kg, sobre las cuales se establecieron plantas de Stipa ichu cultivadas durante 90 días, evaluando la fitoextracción como principal mecanismo de fitorremediación. El muestreo de suelo y tejido vegetal (raíces, tallos y hojas) se efectuó al inicio y al final del ensayo, determinándose las concentraciones de Pb por medio de espectrofotometría de impregnación atómica (AAS). Los hallazgos enseñaron que Stipa ichu logró acumular 310.45 mg de Pb/kg de biomasa seca, equivalente a una eficiencia de remoción del 36.5%, con mayor retención del metal en las raíces (195.8 mg/kg) que en la parte aérea (114.6 mg/kg). Se observó además que las condiciones de pH próximas a 6.0 y conductividad eléctrica de 480 µS/cm

favorecieron la solubilidad del plomo y su posterior absorción por la planta. El estudio evidenció que Stipa ichu se adapta a suelos con elevadas reuniones de metales sólidos y condiciones climáticas extremas, actuando como una especie tolerante y acumuladora, lo que confirma su potencial uso en procesos de fitorremediación a gran escala en zonas mineras altoandinas. En conclusión, la investigación demostró que Stipa ichu posee alta eficiencia de fitoextracción y fitoestabilización del plomo, consolidándose como una disyuntiva económica, sostenible y ecológicamente factible para la restitución de pasivos ambientales mineros en el Perú.

En el estudio de Silva et al. (2024) titulada “Empleo de Medicago sativa y Taraxacum officinale en procesos de biorremediación para la rehabilitación de suelos impactados por metales pesados en un vertedero”, Este estudio se propuso valorar la capacidad descontaminante de Medicago sativa (alfalfa) y Taraxacum officinale (diente de león) en la rehabilitación de suelos impactados por plomo (Pb), mercurio (Hg) y cadmio (Cd) en el vertedero de Yacucatina. La metodología implementada fue de tipo aplicado, con paradigma cuantitativo, alcance experimental y diseño aleatorizado integral, ejecutada en ambiente semicontrolado. El muestreo de suelo superficial (0-20 cm) reveló concentraciones basales de Pb=9.41 mg/kg, Cd=5.60 mg/kg y Hg=0.42 mg/kg, registrándose para cadmio y mercurio niveles que excedían los parámetros establecidos en los ECA peruanos. Posteriormente, se establecieron parcelas experimentales sembradas con M. sativa y T. officinale, realizando un seguimiento durante 60 días, tras los cuales se establecieron las reuniones finales de metales en la superficie por medio de espectrofotometría de AAS. Los resultados mostraron que con Medicago sativa las concentraciones finales

fueron Pb = 8.50 mg/kg y Cd = 1.13 mg/kg, lo que representó eficiencias de remoción del 9.68 % y 79.82 %, respectivamente; en tanto que Taraxacum officinale consiguió Pb = 7.39 mg/kg y Cd = 1.36 mg/kg, con eficiencias del 21.57 % y 75.71 %. En ambos casos, las concentraciones finales de metales cumplieron con los valores máximos permitidos por el ECA para suelos agrícolas, evidenciando la efectividad del proceso de fitorremediación. Asimismo, se observó que T. officinale mostró mayor capacidad de fitoextracción para el plomo, mientras que M. sativa presentó mayor eficiencia para la remoción de cadmio, atribuido a su sistema radicular más profundo y a la posible simbiosis con microorganismos rizosféricos. En conclusión, el estudio demostró que ambas especies poseen un elevado potencial para la recobro de superficies polucionadas con metales sólidos, siendo Medicago sativa más eficaz en la eliminación de Cd y Taraxacum officinale en la de Pb, lo que las convierte en alternativas biotecnológicas sostenibles y de bajo coste para la reparación ambiental de botaderos y suelos destituidos.

En cambio, Huamán y Fernández (2020) en su estudio denominado "Evaluación del crecimiento de Chrysopogon zizanioides y Stipa ichu en residuos mineros de San José de Parac, San Mateo de Huanchor, provincia de Huarochirí – Lima", poseyó como propósito valorar la adaptabilidad y cabida de crecimiento de especies nativas Chrysopogon zizanioides (vetiver) y Stipa ichu (ichu) en residuos mineros contaminados del San José de Parac, Lima, como base para determinar su potencial fitorremediador. El estudio fue de tipo aplicada, con enfoque cuantitativo, nivel experimental y DCA, desarrollada en condiciones de campo controladas. Se establecieron 4 procesamientos con desiguales proporciones de residuo minero y acondicionador orgánico: T4 (25% relave +

75% acondicionador), T3 (50% relave + 50% acondicionador), T2 (75% relave + 25% acondicionador) y T1 (100% relave) cada uno con cinco repeticiones por especie, evaluándose variables de crecimiento (altura, biomasa y número de brotes) a los 1, 30, 60 y 90 días después de la siembra. El análisis de caracterización inicial del relave evidenció la existencia de 32 metales sólidos, de los cuales 10 superaron los 100 mg/kg, destacando el Pb (2250 mg/kg), As (157.4 mg/kg) y Cu (1181 mg/kg). El relave presentó pH vigorosamente ácido (2.43), baja MO (0.68%), baja cabida de intercambio catiónico (1.0 meq/100g), conductividades eléctricas de 4.93 dS/m y textura arcillo-arenosa, condiciones que limitan la vegetación natural. Los resultados demostraron que Chrysopogon zizanioides (vetiver) exhibió mayor adaptabilidad y crecimiento promedio (39.6 cm) en comparación con Stipa ichu (23.5 cm), destacando el tratamiento T4 (25% relave + 75% acondicionador) como el más favorable para el vetiver, mientras que Stipa ichu alcanzó su mejor desempeño en el T1 (100% relave), evidenciando su resistencia a condiciones extremas. El análisis estadístico mostró discrepancias no significativas entre procesamientos ($p>0.05$), pero sí discrepancias significativas en el tiempo de crecimiento ($p<0.05$). En conclusión, ambas especies mostraron potencial fitorremediador y capacidad de establecimiento en relaves mineros, destacando Chrysopogon zizanioides por su mayor adaptabilidad, vigor vegetativo y eficiencia en el uso de acondicionadores orgánicos, mientras que Stipa ichu demostró tolerancia a condiciones de estrés hídrico y acidez, lo que reafirma su potencial uso complementario en proyectos de rehabilitación y revegetación de pasivos mineros en zonas altoandinas.

Como Diaz y Peralta (2017) el análisis de “Análisis comparativo del potencial de bioacumulación de Pb y Cd en Scirpus californicus (Totora) y Stipa

ichu (Ichu) cultivados en sistema hidropónico", este estudio se planteó como finalidad analizar la capacidad de fijación y bioacumulación de Pb, Cd y su mezcla (Pb/Cd) en Scirpus californicus (Totora) y Stipa ichu (Ichu), bajo condiciones hidropónicas controladas, identificando el tejido vegetal (sistema radical, tallos u hojas) con mayor acumulación y la concentración óptima para máxima eficiencia de absorción. El estudio fue de tipo aplicada, con enfoque cuantitativo, nivel experimental y DCA, desarrollada en condiciones de laboratorio controladas. Se emplearon soluciones nutritivas contaminadas artificialmente con tres niveles de concentración para cada metal: 20 ppm, 50 ppm y 80 ppm, además de un tratamiento combinado Pb/Cd, utilizando cinco réplicas por procesamiento. Las plantas fueron sembradas durante 30 días en sistemas hidropónicos con pH constante (6,0 ± 0,2) y temperatura controlada (25 ± 2 °C). Posteriormente, las muestras fueron seccionadas en fincas y zona aérea (hojas y tallos), secadas a 60 °C y digeridas con ácidos nítrico y perclórico para su análisis por medio de AAS. Los hallazgos expusieron que Scirpus californicus presentó una mayor capacidad de retención de Pb, especialmente a 20 ppm, alcanzando un 5.924% de retención (equivalente a 1185 ppm de Pb acumulado) en su biomasa total, concentrándose principalmente en las raíces (aprox. 78% del total absorbido). En cambio, Stipa ichu mostró baja eficiencia de acumulación tanto para Pb como para Cd, con valores máximos de retención de 0.87% para Pb y 1.12% para Cd, reflejando una limitada capacidad de absorción en sistemas hidropónicos. La especie Scirpus californicus también evidenció mayor tolerancia fisiológica, sin presentar signos de fitotoxicidad visible, mientras que Stipa ichu mostró amarillamiento foliar y menor biomasa. En conclusión, el estudio demostró que Scirpus californicus (Totora) posee mayor potencial

fitorremediador bajo condiciones hidropónicas, especialmente a bajas concentraciones de metales, debido a su elevada cabida de retención y acopio de Pb en raíces, lo cual la transforma en una alternativa eficiente para la fitoestabilización y recuperación de cuerpos de agua o suelos saturados con plomo y cadmio, a diferencia de Stipa ichu, cuya eficacia es mayor en sistemas de suelo seco y no en medios acuosos.

2.1.3. Antecedentes regionales

El estudio de Arce, Calderón y Jarecca (2021) titulada “Potenciación del proceso de biorremediación utilizando Festuca dolichophylla y tiosulfato de amonio para incrementar la eficiencia de la fitoextracción de mercurio en suelos impactados por la actividad minera en el distrito de Ananea (Puno, Perú)”, poseyó como propósito valorar la eficiencia de la especie nativa Festuca dolichophylla, en combinación con tiosulfato de amonio $(NH_4)_2S_2O_3$, para la deflación del HgT en superficies impactados por actividades mineras artesanales. El estudio fue de tipo aplicada, con enfoque cuantitativo, nivel experimental y DCA. Se establecieron parcelas experimentales con tratamientos que incluyeron la aplicación de Festuca dolichophylla sola y combinada con tiosulfato de amonio al 0.1% y 0.5%, evaluándose las concentraciones iniciales y finales de Hg en la superficie y en el tejido vegetal durante 90 días de exposición. Los análisis fisicoquímicos iniciales mostraron suelos con pH neutro (6.9–7.2) y concentraciones totales de mercurio de 43.67 mg/kg, superando casi el doble del límite máximo permisible según los estándares ambientales peruanos (25 mg/kg para suelos agrícolas). Los hallazgos precisaron que la diligencia conjunta de Festuca dolichophylla con tiosulfato de amonio al 0.5%

logró una reducción del mercurio total en el suelo del 82%, alcanzando valores finales promedio de 7.86 mg/kg, mientras que el tratamiento sin tiosulfato redujo solo el 57%. El factor de bioacumulación (BAF) en hojas fue de 0.38, clasificando a Festuca dolichophylla como una especie acumuladora moderada, con capacidad significativa de inmovilización radicular del metal. En conclusión, el estudio demostró que la fitorremediación asistida con Festuca dolichophylla y tiosulfato de amonio es altamente efectiva para la descontaminación de suelos con Hg, destacando la sinergia entre la planta y el agente quelante, que incrementa la biodisponibilidad del metal y su absorción. Se concluye que esta estrategia constituye una disyuntiva sostenible, de coste bajo y ambientalmente viable para la rehabilitación de zonas mineras contaminadas con Hg en el altiplano puneño, promoviendo la restauración ecológica y la reducción del riesgo ambiental asociado.

Según el estudio Arce (2023) en su investigación titulada “Valoración de la efectividad de Stipa ichu y Festuca dolichophylla en combinación con tiosulfato de amonio e ioduro de potasio para la descontaminación de suelos impactados con mercurio debido a la minería en el distrito de Ananea (Puno, Perú)”, este estudio se planteó como finalidad establecer la efectividad del proceso de biorremediación empleando las especies autóctonas Stipa ichu y Festuca dolichophylla. El estudio se caracterizó por ser de naturaleza aplicada, con un paradigma cuantitativo, alcance experimental y un diseño factorial con aleatorización completa, desarrollada en condiciones de laboratorio controladas utilizando suelos colectados en zonas impactadas por mercurio desde la década de 1990. Se evaluaron como variables respuesta la concentración de mercurio total (HgT) en suelo y en tejidos vegetales (raíces, tallos y hojas), y como factores

experimentales, la dosis de tiosulfato de amonio o ioduro de potasio (0 g y 2 g/kg de suelo) y el tiempo de crecimiento de las plantas (0, 30, 60 y 90 días). Los suelos presentaron pH neutro (6.8–7.1), con concentraciones iniciales de HgT entre 44 y 53 mg/kg, aproximadamente dos veces superiores al límite máximo permisible (24 mg/kg) para suelos extractivos según la normativa peruana. Los resultados evidenciaron que la aplicación conjunta de Festuca dolichophylla con 2 g/kg de tiosulfato de amonio redujo el contenido de Hg T en la superficie en 43.67 mg/kg, consiguiendo una eficiencia de remoción del 82%, mientras que Stipa ichu bajo las mismas condiciones logró una reducción del 73%. En términos de bioacopio, el BAF obtenido para Festuca dolichophylla fue de 0.38 con tiosulfato de amonio y 0.20 con ioduro de potasio, en tanto que para Stipa ichu los valores fueron de 0.22 y 0.17, proporcionalmente, clasificándolas como plantas acumuladoras moderadas y no hiperacumuladoras. En conclusión, el estudio demostró que Festuca dolichophylla presenta mayor eficiencia de remoción de mercurio total (HgT) en comparación con Stipa ichu, y que la adición de tiosulfato de amonio actúa como un agente quelante eficaz, aumentando la biodisponibilidad del mercurio y favoreciendo su absorción vegetal. De esta manera, la combinación de Festuca dolichophylla con tiosulfato de amonio se perfila como una estrategia biotecnológica prometedora, económica y ambientalmente factible para la remediación de superficies polucionados por mercurio en ecosistemas altoandinos mineros.

Como Torres (2018) en su estudio denominado “Evaluación de la reunión de metales solidos como Cu, As, Hg, Cd Y Pb en el vertedero de Cancharani de la ciudad de Puno”, se propuso como objetivo principal analizar el grado de polución por elementos metálicos en las superficies circundantes al vertedero

municipal de Cancharani, contrastando los datos obtenidos con los parámetros establecidos en los ECA para superficies del Ministerio del Ambiente del Perú. El estudio correspondió a una investigación de carácter aplicado, con paradigma cuantitativo, alcance descriptivo-comparativo y diseño no experimental, implementado mediante un muestreo sistemático en nueve estaciones distribuidas perimetralmente alrededor del vertedero, a una profundidad de 40 cm, para caracterizar el estrato más impactado por los lixiviados. Las muestras fueron procesadas mediante espectrofotometría de absorción atómica (AAS) con atomización electrotérmica en horno de grafito para cuantificar las concentraciones de arsénico, cadmio, cobre, plomo y mercurio. Los hallazgos evidenciaron que los suelos presentaban contaminación significativa por plomo (90 mg/kg), cadmio (2.2 mg/kg) y cobre (153 mg/kg), superando los límites máximos establecidos por los ECA para suelos agrícolas, mientras que el arsénico (31 mg/kg) y el mercurio (0.37 mg/kg) se mantuvieron dentro de los valores permitidos. El análisis espacial mostró una disminución progresiva de Cd, Pb, Cu y Hg con la distancia al botadero, evidenciando un patrón de dispersión radial asociado a la infiltración de lixiviados, mientras que el As presentó un comportamiento inverso por posibles factores geoquímicos. En conclusión, el estudio determinó que el vertedero de Cancharani forma una fuente activa de polución difusa, generando alteraciones químicas en el suelo y riesgos ambientales y sanitarios, principalmente por el acopio de plomo, cadmio y cobre en concentraciones superiores a los estándares nacionales.

En el estudio de Pacompia (2023) titulada “Impacto de los lixiviados del vertedero municipal en la contaminación del suelo por metales pesados en el distrito de Ilave - 2023”, este estudio se planteó como finalidad identificar y

cuantificar metales pesados (As, Cd, Hg, Pb) en lixiviados y suelos aledaños al vertedero municipal de Ilave, para valorar su efecto en el ecosistema y la pertinencia de implementar estrategias de control y seguimiento. La metodología empleada consistió en la colecta de muestras de lixiviados y suelos en ubicaciones estratégicas del vertedero. Se tomaron muestras de lixiviados en el punto P4, mientras que las superficies se muestrearon en tres puntos distintos (P1, P2 y P3) a diferentes distancias del centro del botadero. Los resultados mostraron la existencia significativa de metales solidos tanto en lixiviados como en suelos del vertedero municipal. En los lixiviados (P4), se registraron concentraciones de arsénico (As) 1.0099 mg/L, cadmio (Cd) 0.12789 mg/L, mercurio (Hg) 0.00007 mg/L y plomo (Pb) 0.53794 mg/L, indicando filtración activa hacia el suelo. En los suelos, los muestreos mostraron niveles variables: en P1, As 33.8 mg/kg, Cd 0.7347 mg/kg, Hg 0.010 mg/kg y Pb 56.36 mg/kg; en P2, As 25.7 mg/kg, Cd 0.4834 mg/kg, Hg 0.008 mg/kg y Pb 52.98 mg/kg; y en P3, As 28.9 mg/kg, Cd 0.5964 mg/kg, Hg 0.011 mg/kg y Pb 55.64 mg/kg. Si bien estos valores se mantienen dentro de los LMP para superficies agrícolas como el MINAM, evidencian un efecto persistente de los lixiviados sobre el suelo, con acumulación constante de metales sólidos, especialmente Pb, Cd y As, mostrando un riesgo ambiental potencial si no se aplican medidas de control y monitoreo constante. En conclusión, el estudio confirma que los lixiviados del vertedero municipal de Ilave generan un impacto directo sobre los suelos cercanos, evidenciado por la existencia consistente de metales sólidos, principalmente Pb, As y Cd.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Fitorremediación

La biorremediación vegetal es una tecnología que emplea especies vegetales y su microbiota asociado para descontaminar sustratos como suelos, sedimentos, aguas y atmósfera. Este mecanismo se fundamenta en la utilización de plantas con cabida de acumular, degradar, estabilizar o remover contaminantes ambientales mediante procesos como la fitoextracción, fitovolatilización, transformación metabólica o bioacumulación (Montano, Tapia, Fow, & Fuentealba, 2022).

2.2.1.1. Técnicas de Fitorremediación

La biorremediación vegetal es un método que aprovecha la habilidad de determinadas plantas y microorganismos para tolerar compuestos contaminantes mientras los extraen, acumulan, estabilizan o transforman del suelo. Esta tecnología es aplicable in situ o ex situ, y las especies utilizadas poseen mecanismos constitutivos y adaptativos que les permiten soportar o concentrar altos niveles tóxicos de metales en su zona rizosférica. Esta técnica integra mecanismos de biotecnología vegetal como la rizofiltración, que remueve contaminantes de medios acuáticos mediante sistemas radiculares; la fitoestimulación, que activa microorganismos rizosféricos para degradar compuestos tóxicos; y la fitoestabilización, que immobiliza contaminantes en el suelo mediante procesos de adsorción y acumulación radical con precipitación en la zona rizosférica; Fitoextracción: absorción de metales contaminantes a través del sistema radicular y su posterior translocación hacia tallos y hojas; Fitodegradación: descomposición de contaminantes en compuestos

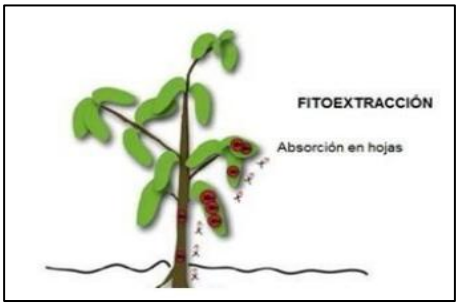
menos tóxicos o inocuos; y Fitovolatilización: incorporación de agua con contaminantes orgánicos e inorgánicos que, al transpirar por las hojas, se liberan en forma volátil a la atmósfera (Gómez Navarro & Galdames, 2017).

a) La Fito extracción:

Constituye una de las múltiples estrategias de biorremediación vegetal, cuya finalidad primordial es la remoción eficiente de contaminantes mediante procesos secuenciales que incluyen la captación, el transporte, la redistribución tisular y el almacenamiento en tejidos vegetales (Neaman, 2022). La fitoextracción consiste en la captación de metales contaminantes mediante el sistema radicular y su posterior acumulación en los tejidos aéreos. Para aplicar esta tecnología, inicialmente se eligen las especies vegetales más adecuadas según los metales presentes y las condiciones del lugar. Una vez completado el desarrollo vegetativo, la biomasa se cosecha, incinera y las cenizas resultantes se disponen en un depósito de seguridad (Neaman, 2022).

Figura 1

Fitoextracción para la remoción de metales pesados.



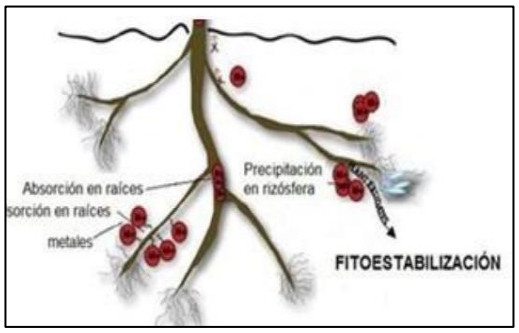
Nota. Imagen extraída de la Fito extracción, citado por Neaman (2022).

b) La Fito estabilización

La fitoestabilización emplea mecanismos de adsorción radicular o precipitación química para inmovilizar y disminuir la concentración de contaminantes en suelos y aguas. Una de sus principales ventajas reside en impedir la incorporación de metales pesados a las redes tróficas de los ecosistemas (Delgadillo López & et al, 2011).

Figura 2

Fito estabilización para la remoción de metales pesados



Nota. Imagen extraída de la Fitoextracción, citado por Delgadillo (2011).

c) La Fito volatilización

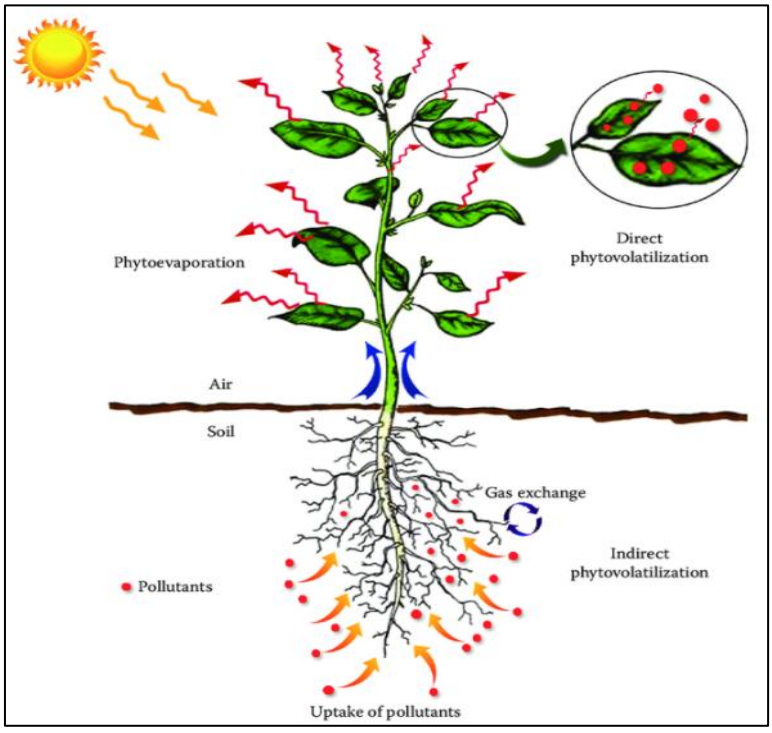
La fitovolatilización ocurre durante el desarrollo vegetal mediante la absorción de poluciones. Estos compuestos son translocados hacia los órganos foliares donde se transforman en estado volátil y son liberados a la atmósferae (Delgadillo López & et al, 2011).

La eficiencia de este proceso pende de elementos ambientales como el temple, humedad del superficie, pH y tipo de contaminante, así como de las propiedades fisiológicas de la planta, su tasa de

transpiración y su capacidad metabólica para transformar los compuestos absorbidos. Aunque la fito-volatilización contribuye a reducir la carga contaminante del suelo y el agua, debe evaluarse cuidadosamente el impacto atmosférico de los compuestos liberados, ya que algunos pueden mantener cierto grado de toxicidad. Por ello, este mecanismo se considera más apropiado para contaminantes que pueden transformarse en formas gaseosas estables y de baja peligrosidad, constituyendo una alternativa ecológica complementaria dentro de las estrategias de fitorremediación sostenible (Susarla, Medina, & McCutcheon, 2002).

Figura 3

Fito volatilización para la remoción de metales pesados



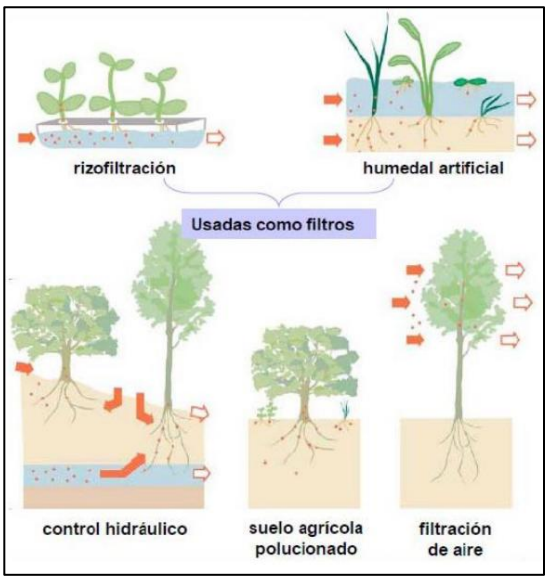
Nota. Imagen extraída de Fitorremediación de suelos, citado por Delgadillo (2011).

d) La Rizo filtración

La rizofiltración emplea sistemas radiculares vegetales para captar y retener poluciones hidrosolubles. Esta tecnología utiliza especies acuáticas especializadas, contribuyendo a impedir la incorporación de sustancias tóxicas en las redes tróficas (Delgadillo López & et al, 2011).

Figura 4

Rizo filtración para la remoción de metales pesados.



Nota. Imagen extraída del informe de Fitorremediación, citado por Delgadillo (2011).

e) Especies Vegetales

La absorción de metales por parte de la vegetación varía significativamente según la especie vegetal, las propiedades edáficas y la concentración de elementos metálicos en el suelo. Las respuestas fisiológicas a la presencia de metales difieren entre taxones; se han catalogado más de 400 hiperacumuladores, entre los cuales destacan 300 especializados en níquel, mientras otras especies muestran capacidad para acumular cadmio, cobre, plomo y zinc, como

(Van der Ent A. B., 2013). La mayor parte de las especies utilizadas en fitorremediación se clasifican en las familias Cruciferae, Asteraceae, Solanaceae, Poaceae, Euphorbiaceae, Fabaceae, Caryophyllaceae y Rosaceae según la taxonomía vegetal. Las crucíferas son particularmente relevantes por incluir hiperacumuladores de sabor desagradable para los herbívoros, lo que puede minimizar la transferencia de metales a través de las redes tróficas durante los procesos de fitoextracción. Los elementos metálicos con mayor biodisponibilidad para la absorción vegetal incluyen cadmio, níquel, zinc, arsénico, selenio y cobre; mientras que cobalto, manganeso y hierro presentan una asimilación moderada. Por el contrario, el plomo, cromo y mercurio manifiestan una menor capacidad de incorporación por parte de los vegetales.

En términos generales, las especies hiperacumuladoras presentan concentraciones foliares de metales entre 10 y 100 veces superiores a los niveles convencionales. Contemporáneamente, se define como hiperacumuladora a toda planta que almacena más de 10,000 mg/kg de Mn y Zn; más de 1,000 mg/kg de Co, Cu, Pb, Ni, As y Se; y más de 100 mg/kg de Cd. Esta característica se sustenta en mecanismos fisiológicos naturales que permiten captar y almacenar nutrientes según su biodisponibilidad edáfica y las demandas metabólicas de la planta. Las siguientes especies botánicas poseen cabida descontaminante para metales solidos en suelos afectados: Arabidopsis halleri (Berro de zinc), Helianthus annuus (Girasol), Salix spp. (Sauce), Urtica dioica (Ortiga), Pteris vittata (Helecho de lenteja), Juncus spp. (Juncia), Carduus

acanthoides (Cardo de plomo) y Brassica juncea (Nabo forrajero). Cabe destacar que existen más de 27 taxones vegetales con esta propiedad fitorremediadora, cada uno con distintos niveles de eficiencia en la absorción de contaminantes (Van der Ent A. B., 2013).

Tabla 2

Factor de Translocación (FT

Autor	Especie nativa	Metales con factor traslocador
Fow (2021)	Werneria nubigena	Al, Cu, Fe y Zn
	Calamagrostis spp.	Cu, Fe y Zn
	Paranephelius ovatus	Zn
Chuptaya & Molina	Schinus molle	Hg
(2022)	Acacia macracantha	Ba, Sr, Hg y Zn
Corpus (2018)	Calamagrostis recta (Kunth)	
	Cortaderia jubata (Lemoine)	
	Festuca glicerlantha	Zn
Chang et al. (2018)	Achyrocline alata	Cd, Pb
	Calamagrostis recta (Kunth)	
	Cortaderia jubata (Lemoine)	
	Festuca glicerlantha	
	Juncus bufonius	Ni y Zn
	Stipa ichu	
	Werneria nubigena	Cd, Cu, Ni, Pb y Zn
Martínez (2018)	Baccharis salicifolia	
	Schoenoplectus pungens	
León (2017)	Achyrocline alata	Cd, Ni y Zn
	Werneria nubigena	Cd, Cu, Ni, Pb y Zn
	Juncus arcticus	
Dávila et al. (2018)	Calamagrostis tarmensis	Cr, Mg, Mn y Tl
	Paspalum bonplandianum	Cr, Mg, Mn, Ni, Sn y Sr
	Carex pichinchensis	Mg, Mn, Ni, Sn y Sr
	Lachemilla orbiculata	Mg, Mn, Ni, Sn y Sr
	Juncus conglomeratus	Mg, Mn, Ni, Sn y Sr
Torres (2018)	Stipa ichu	Zn

Nota. Tabla extraída del “especies autóctonas”, citado por Van der Ent (2013).

2.2.2. Enmiendas orgánicas

Los acondicionadores edáficos optimizan la textura y productividad del terreno, incrementando los nutrientes disponibles, mitigando la emisión de gases con efecto invernadero y minimizando la degradación del suelo. Gracias a su capacidad de retención hídrica y nutricional, estos mejoradores rehabilitan terrenos deteriorados, alcanzando así una mayor productividad agropecuaria y secuestro de carbono de manera sustentable. El Humus surge de la degradación aeróbica regulada de desechos orgánicos mediante actividad microbiana. Su aplicación al terreno provee elementos nutritivos, optimiza la estructura edáfica e incorpora microbiota beneficioso. Estos efectos positivos promueven un desarrollo vegetal óptimo y mejoran la calidad del suelo de forma sostenible. Sus principales beneficios como fertilizante incluyen: incremento del contenido de materia orgánica, mejoramiento de la estructura edáfica, mayor capacidad de retención hídrica y estímulo del desarrollo de actividad microbiológica (Food and Agriculture Organization of the United Nations., 2021).

2.2.3. Stipa Ichu

La especie Stipa ichu corresponde a la familia de las gramíneas y se distribuye desde México hasta Argentina. En el Perú, se encuentra predominantemente en regiones altoandinas y del altiplano. Se trata de una planta perenne que alcanza hasta 80 cm de altura, de hojas rígidas y puntiagudas, con láminas foliares de 10 a 33 cm que presentan un haz áspero y un envés glabro. Sus espiguillas poseen pedicelos cortos y glumas de 6-8 mm de largo. Además, constituye un recurso alimenticio para camélidos sudamericanos y se emplea tradicionalmente en la construcción de viviendas, techumbres y puentes (Arce Sancho, 2023)

2.2.3.1. Taxonomía de Stipa Ichu

De acuerdo a la clasificación taxonómica Arce (2023) describe lo siguiente:

Tabla 3

Taxonomía de la especie Stipa ichu.

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

Nota. Tabla extraída de la clasificación taxonómica, citado por Arce (2023).

2.2.3.2. Características de la especie Stipa ichu

El Stipa ichu es una especie herbácea de crecimiento vertical que se desarrolla en agrupaciones densas denominadas macollas. Presenta tallos que oscilan entre 60 y 180 cm de longitud, con cada tallo conteniendo más de tres nudos. Estos nudos pueden presentar indumento variable (glabros o pubescentes), mientras que los entrenudos muestran

consistentemente textura áspera y presencia de tricomas (Arce Sancho, 2023).

a) Hojas

Las hojas presentan morfología filiforme y textura rígida, con la sección basal glabra. Sus dimensiones oscilan entre 30-60 cm de longitud y menos de 4 mm de anchura. La zona del cuello foliar presenta tricomas de aproximadamente 1 mm de largo, mientras que en la unión entre la vaina y el limbo se observa una membrana de 2 mm de longitud. La lámina foliar muestra disposición plegada o con márgenes enrollados hacia el interior, con superficie de textura escábrida o potencialmente pubescente en el haz (Arce Sancho, 2023).

b) Flores

Las unidades de inflorescencia presentan pedicelos reducidos y contienen flores perfectas con glumas de tonalidad púrpura o translúcidas, que miden 6-10 mm de longitud por aproximadamente 1 mm de anchura, exhiben tres nervaduras y terminan en un ápice marcadamente acuminado. Las brácteas, de morfología fusiforme, alcanzan 2-3.5 mm de largo, presentan coloración parda clara y están cubiertas de tricomas blanquecinos. Las aristas, que se originan del lema, son elongadas, de trayectoria sinuosa, y pueden carecer de pubescencia o presentar superficie escábrida (Arce Sancho, 2023).

Figura 5

Se muestra la especie Stipa Ichu.



Nota. Imagen extraída de especies andinas, citado por Arce (2023).

2.2.4. Festuca dolichopthylla

Se trata de especies herbáceas perennes que alcanzan entre 10 cm y 2 m de altura, con una amplia distribución global que abarca todos los continentes a excepción de la Antártida. Filogenéticamente, el género presenta estrecha relación con Lolium, y análisis recientes de secuenciación de ADN mitocondrial revelan su carácter no monofilético. La complejidad taxonómica dificulta precisar el número exacto de especies, con estimaciones que varían entre 400 y más de 500 entidades. En la región neotropical, es endémico de Costa Rica, Panamá y múltiples países sudamericanos (Bolivia, Chile, Argentina, Colombia, Ecuador, Perú), donde habita en páramos y laderas expuestas con depósitos volcánicos entre los 3 000 y 3 400 m s.n.m (Arce Sancho, Calderón Celis, & Jarecca Cusacani, 2021).

2.2.4.1. Taxonomía de Festuca dolichopthylla

Reino: Plantae.

Clase: Liliopsida.

Orden: Poales.

Familia: Poaceae.

Género: Festuca

Especie: Festuca dolichophylla J. Presl

Figura 6

Se muestra la especie Festuca dolichopthylla.



Nota. Imagen extraída de libro de especies, citado por Arce (2021).

2.2.5. Metales pesados en el suelo

Los metales (y metaloides) en superficie provienen de fuentes naturales (meteorización de minerales, vulcanismo) y antrópicas (minería, fundición, tráfico, agroquímicos, residuos). En superficie, su comportamiento pende de la especiación (forma química) y de procesos como adsorción/desorción, complejación con materia orgánica, precipitación/disolución y redox, que controlan movilidad y biodisponibilidad para plantas y biota (Li, 2022).

2.2.5.1. Suelos Contaminados

Se considera suelo contaminado aquel que ha sido alterado por la incorporación de compuestos químicos o agentes contaminantes que implican un peligro potencial para la salud pública, los organismos vivos y los ecosistemas. Estos agentes pueden incluir sustancias industriales, elementos metálicos pesados, agroquímicos, residuos peligrosos, productos de uso doméstico y otros materiales que, al depositarse o infiltrarse en el terreno, modifican sus propiedades naturales y funcionalidad. Esta degradación puede comprometer la productividad edáfica, la pureza de los acuíferos y el bienestar de los seres que dependen de este recurso. Si bien la mayoría de los contaminantes son de origen antrópico, algunos componentes minerales naturales pueden igualmente representar un riesgo cuando alcanzan concentraciones elevadas (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2021)

Los elementos metálicos pesados poseen propiedades características como ductilidad, conductividad eléctrica, elevada densidad, estabilidad como cationes y especificidad de unión a ligandos; además presentan diversas particularidades fisicoquímicas y biológicas, y se ha establecido que forman complejos como iones libres o intervienen en reacciones de óxido-reducción que pueden resultar perjudiciales para los seres vivos. Según su impacto biológico, estos metales se clasifican en tres grupos: Micronutrientes (elementos esenciales con funciones metabólicas definidas: Na, K, Mg, Ca, V, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Mo y W); Metales tóxicos (Ag, Cd, Cr, Sn, Au, Hg, Ti, Pb, Al, incluso en bajas

concentraciones, y metaloides como Ge, As, Sb y Se) que generan efectos adversos; y Metales no esenciales, carentes de toxicidad y con funciones biológicas desconocidas (Rb, Cs y Sr) (Beltrán Villavicencio, 2001).

2.2.5.2. Metales pesados en el suelo

El plomo, metal pesado de alta persistencia, se acumula en los suelos como resultado de actividades antropogénicas como la minería, procesos industriales y aplicaciones de pintura. Este elemento induce modificaciones en la estructura edáfica y compromete la biodisponibilidad de nutrientes esenciales, degradando la calidad del terreno. Asimismo, puede incorporarse a las redes tróficas mediante la absorción vegetal, impactando negativamente en la biota local. La contaminación plúmbea también altera las propiedades físicas del suelo, mermando su capacidad de retención hídrica y su productividad. Por su parte, el cadmio representa un contaminante frecuente en suelos asociado a fuentes industriales, deposición atmosférica y aplicación de fertilizantes. Este metal modifica la estructura del suelo y su capacidad de almacenar agua, incrementando los riesgos de erosión y reduciendo la fertilidad edáfica (Uriña, 2022). La presencia persistente de cadmio en los suelos incrementa la citotoxicidad de estos ecosistemas, comprometiendo tanto el desarrollo vegetal como la supervivencia de la fauna asociada (Valarezo, Carrillo Zenteno, Rubio Zapata, Peña Salazar, & García Orellana, 2022).

2.2.5.3. Efecto de los metales pesados como cadmio, mercurio, plomo, arsénico y cobre

El concepto de metal pesado designa a aquellos elementos metálicos con elevada densidad que presentan características tóxicas o venenosas incluso en concentraciones mínimas. Algunos ejemplos representativos son el mercurio (Hg), cadmio (Cd), arsénico (As), cromo (Cr), talio (Tl) y plomo (Pb), entre otros elementos metálicos y metaloides (Balali Mood, Naseri, Tahergorabi, Khazdair, & Sadeghi, 2021).

a) Plomo

El Pb es metal pesado no esencial y neurotóxico. En suelos proviene de fuentes geogénicas (minerales de Pb) y, sobre todo, antrópicas: minería y fundición, combustibles históricos con plomo, pinturas, baterías, fundentes y residuos (Ruby, 1999).

Comportamiento geoquímico:

- Predomina como Pb^{2+} y como sales poco solubles (carbonatos, sulfatos, fosfatos).
- Fuerte adsorción a óxidos de Fe/Mn, arcillas y elemento orgánica, la movilidad es baja.
- pH controla su biodisponibilidad: a pH ácido aumenta la fracción soluble/intercambiable; a pH neutro-alcalino se inmoviliza por precipitación/adsorción.
- En plantas, el Pb se acumula en raíces; la translocación a tallos/hojas es generalmente baja (Ruby, 1999).

b) Cadmio

El Cd es un metal pesado no vital y carcinógeno para humanos, con efectos críticos en riñón, hueso y sistema respiratorio. Su presencia en suelos deriva de aportes geogénicos (minerales de Zn–Pb–Cu que lo co-ocurren) y, sobre todo, antrópicos: minería y fundición, fosfatos minerales (fertilizantes), lodos, combustibles y residuos industriales (Luo, 2021).

Comportamiento geoquímico y biodisponibilidad:

- En suelos, el Cd suele encontrarse como Cd^{2+} y como complejos con cloruros, carbonatos y materia orgánica.
- La movilidad está controlada por pH (a menor pH aumenta la fracción soluble/intercambiable), redox (Eh), textura/arcillas, óxidos de Fe/Mn y MO (adsorción/quelación).
- En condiciones ácidas y con baja MO, el Cd es altamente biodisponible; en suelos neutro-alcalinos tiende a inmovilizarse por adsorción/precipitación (Luo, 2021).

Transferencia suelo–planta:

- El Cd presenta alta afinidad por raíces y puede traslocarse a partes aéreas más que otros metales, lo que incrementa el riesgo alimentario (cereales, hortalizas).

- Mecanismos de tolerancia vegetal: adsorción en pared celular, quelación citosólica (fitochelatinas, glutatión) y secuestro vacuolar (Luo, 2021).

c) Cobre

El Cu es un micronutriente vital para plantas y humanos, en exceso resulta fitotóxico y puede afectar salud (p. ej., daño hepático). En suelos proviene de fuentes geogénicas (sulfuros y óxidos de Cu) y antrópicas (minería/fundición, pesticidas cúpricos, lodos, residuos). Su comportamiento está gobernado por especiación y procesos de adsorción–desorción, complejación con MO, precipitación (carbonatos, hidróxidos) y reacciones redox. En general, el Cu muestra movilidad baja por su fuerte afinidad a óxidos de Fe/Mn, arcillas y elemento orgánico; la acidez (pH bajo) y baja MO aumentan su fracción soluble/biodisponible (Beltrán Villavicencio, 2001).

Comportamiento del Cu en el suelo:

- Especiación dominante. En suelos, el Cu aparece como Cu^{2+} y en complejos con hidróxidos, carbonatos, cloruros y, sobre todo, con sustancias húmicas (Beltrán Villavicencio, 2001)
- Alta retención (movilidad generalmente baja). Se adsorbe fuertemente a:
  - ✓ Óxidos/hidróxidos de Fe y Mn (sorción específica).
  - ✓ Arcillas (sitios de intercambio y bordes).

- ✓ Materia orgánica (complejos Cu–humus muy estables).

- Factores que aumentan la fracción lábil (y riesgo de movilidad/biodisponibilidad):
  - ✓ pH bajo (acidez): protona sitios de sorción y disuelve carbonatos → más Cu^{2+} libre.
  - ✓ Baja MO/CIC: menos sitios de complejación/retención.
  - ✓ Competencia iónica: altas concentraciones de H^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^+ desplazan Cu de sitios de sorción.
  - ✓ Quelantes y sales (p. ej., Cl^-, SO_4^{2-}): forman complejos solubles (Beltrán Villavicencio, 2001).
  - ✓ Redox y sulfuro: en medios muy reductores, el Cu puede precipitar como CuS (inmoviliza); al oxidarse, aumenta la solubilidad.

Transferencia del Cu del suelo a la planta:

- Ingreso a la raíz (apoplasto/simplasto).
  - ✓ El Cu llega principalmente como Cu^{2+} o complejado; atraviesa la rizosfera y entra a células de la epidermis/corteza mediante transportadores de alta afinidad (familias COPT/Ctr, ZIP) y canales no específicos cuando hay exceso (Beltrán Villavicencio, 2001).

- ✓ En la pared celular puede quedar adsorbido (primer "filtro" que reduce la entrada efectiva).

- Detoxificación y transporte interno.
  - ✓ Quelación intracelular con fitochelatinas/glutatión y proteínas metalotioneínas; secuestro vacuolar en raíces (baja traslocación).
  - ✓ Carga xilemática como complejos con ácidos orgánicos/aminoácidos; el Cu se mueve hacia brotes, pero, en variedad de especies, la traslocación (TF) es menir comparada con Zn o Cd (Beltrán Villavicencio, 2001).

2.2.6. Suelos con metales pesados producto de lixiviados

El lixiviado es el fkuente que percola a través del residuo y arrastra compuestos orgánicos e inorgánicos. Su composición típica incluye: (i) materia orgánica disuelta (ácidos húmicos/fúlvicos, AGV); (ii) metales (p. ej., Cu, Mn, Cd, Ni, Pb, Zn); (iii) compuestos orgánicos xenobióticos (fenoles, disolventes, pesticidas); y (iv) macro-inorgánicos, con rangos que dependen de la edad del relleno y del clima (Abdel Shafy & Mansour, 2024).

2.2.6.1. Vías de contaminación del suelo y factores de control

Cuando no existen sistemas adecuados de impermeabilización y captación del lixiviado, este se infiltra hacia el suelo aledaño, modificando pH, conductividad eléctrica (CE), relaciones redox y el microbiota edáfico. En suelos receptores, los metales se retienen por adsorción en óxidos de Fe/Mn, arcillas y elemento orgánico, o precipitan como

carbonatos/hidróxidos; sin embargo, en condiciones ácidas y con baja MO aumenta la fracción lábil (intercambiable/soluble) y, con ello, la biodisponibilidad (Kjeldsen , y otros, 2002).

2.2.6.1. Contaminación por lixiviados

Según Novelo (2002) indica que el lixiviado es el fluido resultante del proceso de drenaje del excedente hídrico de los desechos sólidos y de la percolación del agua pluvial a través de los estratos de residuos en fases mixtas. Estos efluentes se catalogan como el contaminante primario y más potente generado en los vertederos controlados. Se define como lixiviado a todo líquido que interactúa con los desechos de estos sitios de disposición final, formado ya sea por la disolución de componentes de los residuos sólidos urbanos al contactar con el suelo, o por la dinámica inherente a su proceso de descomposición (Sossou, 2024).

2.2.6.1.1. Factores que afectan la acumulación de metales pesados

Los primordiales factores de la superficie que alteran el conjunto y disponibilidad de los metales son:

a) pH

El pH constituye uno de los factores de mayor incidencia en los procesos edáficos, la reactividad del suelo y la movilidad de contaminantes. Fundamentalmente, las fracciones iónicas más lábiles se presentan en los intervalos inferiores de pH. Si bien la mayoría de los metales muestran mayor biodisponibilidad en condiciones ácidas, en términos generales, al incrementarse el pH

del suelo, disminuye la solubilidad de numerosos metales pesados y la concentración de oligoelementos es menor en soluciones de suelos neutros y alcalinos comparados con aquellos ligeramente ácidos. Diversas investigaciones han analizado la variabilidad en la solubilidad del cobre y cadmio en suelos contaminados en relación con los niveles metálicos presentes, el pH y el contenido de materia orgánica. Esta influencia del pH se evidencia igualmente al examinar la distribución metálica entre el suelo y su solución, observándose una reducción significativa en la disponibilidad del metal conforme aumenta el pH (Liu, 2020).

b) Materia orgánica

La materia orgánica posee la capacidad de adsorber con tal intensidad ciertos metales (cadmio, plomo, arsénico) que estos pueden quedar inmovilizados e inaccesibles para la vegetación. Esta es la razón por la cual algunas plantas cultivadas en suelos con alto contenido orgánico manifiestan deficiencias de Cd, Pb y Zn, lo que no implica ausencia de contaminación, dado que las comunidades microbianas se ven drásticamente reducidas. La textura del suelo condiciona la penetración y percolación de la contaminación metálica; por ejemplo, los suelos arcillosos tienden a fijar los metales pesados en sus sitios de intercambio, mientras que los suelos arenosos carecen de esta capacidad, permitiendo que los metales migren rápidamente hacia el subsuelo y contaminen los acuíferos. Diversas investigaciones han analizado

el efecto de la materia orgánica en la retención metálica: algunos estudios han examinado simultáneamente la adsorción de Cd, Cu y Pb, concluyendo que mayores concentraciones de materia orgánica incrementan específicamente la retención de cadmio. (Impellitteri, 2020).

c) Textura

La arcilla adsorbe a los metales, que quedan detenidos en sus posiciones de alteración. Las superficies básicos con alto comprendido de arcilla muestran mayor capacidad de retención de metales, mientras que los suelos ácidos con bajo contenido de arcilla muestran mayor oscilación de metales como Ni y Zn (Basta, 2005).

d) Conductividad Eléctrica

La conductividad eléctrica representa el parámetro empleado para determinar el nivel de salinidad edáfica, dado que se correlaciona directamente con la concentración iónica en solución. Los suelos con alta salinidad generalmente presentan un pH alcalino. Este indicador cuantifica la concentración total de sales solubles en el agua de irrigación, y su medición se fundamenta en el principio de que la transmisión de corriente a través de una solución salina se incrementa proporcionalmente con la concentración de electrolitos disueltos (Intagri, 2020).

2.2.7. Impacto de los residuos sólidos en el suelo

Los remanentes sólidos mal gestionados—en especial cuando se disponen en botaderos a cielo abierto—generan impactos directos e indirectos sobre el suelo por aporte de contaminantes, modificación de sus propiedades y alteración de la biota edáfica. El vector principal es el lixiviado (percolado que arrastra compuestos orgánicos e inorgánicos), junto con la deposición de polvo por tránsito y quemas a cielo abierto (Tchobanoglous, Theisen, & Vigil, 1994).

2.2.7.1. Botadero de basura

Se define como vertedero incontrolado al área donde los desechos sólidos son depositados sin ningún proceso de clasificación o manejo técnico, operando sin parámetros de ingeniería en zonas de recarga hídrica adyacentes a cuerpos de agua o drenajes naturales. En estos emplazamientos no se aplican medidas de control sanitario ni se mitiga la degradación ambiental. La atmósfera, los recursos hídricos y el suelo se ven afectados por la generación de gases, lixiviados, incendios espontáneos, emisiones gaseosas, material particulado y emanaciones odoríferas (Tchobanoglous, Theisen, & Vigil, 1994).

Los residuos se disponen sin ningún tipo de proceso de compactación o cubrimiento diario, a diferencia de un relleno sanitario (Tchobanoglous, Theisen, & Vigil, 1994).

a) Contaminación ambiental

- Atmósfera: Emite gases de secuela invernadero como el metano y CO2 debido a la descomposición y posible incineración de los residuos.
- Suelo y agua: Produce lixiviados (líquidos contaminantes) que se infiltran en la superficie y los liquidos subterráneas (Tchobanoglous, Theisen, & Vigil, 1994).

b) Riesgos para la salud pública

- Propagación de padecimientos: Son un caldo de cultivo para roedores, moscas e insectos que transportan bacterias y virus, causando enfermedades gastrointestinales como cólera, tifoidea y parasitosis en las poblaciones cercanas (Tchobanoglous, Theisen, & Vigil, 1994).
- Exposición a tóxicos: La presencia de desechos industriales amplifica los riesgos al sumar contaminantes químicos peligrosos.
- Impacto en ecosistemas: Afectan a la flora y fauna del entorno, disminuyendo su diversidad. (Tchobanoglous, Theisen, & Vigil, 1994).

2.2.7.2. Factores que afectan la acumulación de metales pesados

La acumulación de metales en plantas y suelos depende de la vacación del metal en la solución de la superficie y de la capacidad de la planta para absorberlo, traslocarlo y detoxificarlo. Esta disponibilidad está controlada por propiedades edáficas, ambientales, químicas del metal, biológicas (planta–microbiota) y de manejo (Avila González, 2017).

Entre los factores edáficos, el pH de la superficie es uno de los más determinantes, ya que controla la solubilidad de los metales. En suelos ácidos (pH < 6), los metales como Pb, Cd, Cu y Zn se hallan en formas más solubles y biodisponibles para las raíces; mientras que en suelos alcalinos (pH > 7) tienden a precipitar o adsorberse en partículas minerales, reduciendo su disponibilidad. Asimismo, la materia orgánica desempeña un papel dual: puede formar complejos orgánicos solubles que facilitan la movilidad de los metales, o bien adsorberlos en estructuras húmicas, disminuyendo su absorción. La textura de la superficie y la cabida de intercambio catiónico (CIC) también influyen; los suelos arenosos con baja CIC permiten mayor movilidad metálica, mientras que los suelos arcillosos y ricos en óxidos de hierro y manganeso tienden a retenerlos con mayor fuerza (Kabata Pendias, 2011).

Los factores biológicos están relacionados con las características morfofisiológicas de la planta. La profundidad y densidad radicular determinan el volumen de superficie visto, y por tanto, la cantidad de metal absorbido. Especies con raíces finas y fibrosas, como Festuca dolichophylla o Stipa ichu, poseen mayor superficie de contacto, lo que incrementa su capacidad de absorción. Del mismo modo, la presencia de exudados radiculares, ácidos orgánicos y enzimas como fosfatasas y oxidoreductasas, puede alterar el pH de la rizosfera, promoviendo la solubilización de los metales y su posterior absorción (Lasat, 2002).

El estado fisiológico de la planta y su fase de crecimiento también afectan la acumulación. Durante las etapas iniciales (vegetativa), la

absorción de metales suele ser mayor debido a la alta tasa de transpiración y crecimiento radicular. Sin embargo, en fases de madurez, la translocación hacia órganos aéreos disminuye, concentrándose los metales principalmente en raíces. Asimismo, las características genéticas determinan la presencia de proteínas transportadoras y metalotioneínas que facilitan el almacenamiento seguro de metales en vacuolas o tejidos no fotosintéticos, evitando efectos tóxicos (Hall, 2002).

2.2.8. Estándar de calidad ambiental

Los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para suelos en el Perú constituyen parámetros técnicos definidos para normar las concentraciones de compuestos químicos en el terreno, con el objetivo de resguardar la salud pública y los ecosistemas. Estas disposiciones buscan asegurar que los suelos conserven condiciones apropiadas para diversos usos (comercial, industrial, extractivo) mediante la especificación de límites máximos admisibles para múltiples contaminantes. Metales como el plomo (Pb) y el cadmio (Cd), cuya presencia en el suelo puede impactar severamente la salud humana -afectando el sistema nervioso y órganos vitales (Martínez, 2018)-, cuentan con valores regulados para las zonas mencionadas. Por el contrario, el zinc, pese a ser un contaminante frecuente, carece de un límite definido en la normativa vigente para dichas categorías de suelo (Ministerio del Ambiente , 2017).

Tabla 4

Estándares de Calidad Ambiental para Suelo del Ministerio de Ambiente.

N°	Parámetros	Suelo Agrícola (mg/kg MS)	Suelo Residencial /Parques (mg/kg MS)	Suelo Comercial/Industrial /Extractivos (mg/kg MS)
1	Cadmio total (mg/kg MS)	1.4	10	22
2	Cromo VI (mg/kg MS)	0.4	0.4	1.4
3	Mercurio total (mg/kg MS)	6.6	6.6	24
4	Plomo total (mg/kg MS)	70	140	1200

Nota. La tabla refleja valores de metales pesados de los "Estándares de condición ambiental ECA –Suelo del ambiente", citado por MINAM (2017).

Tabla 5

Estándares de Calidad Ambiental para el Suelo – Perú y los Soil Quality Guidelines for the Protection of Environmental.

Nombre químico	ECA Perú – suelo agrícola (mg/kg)	CEQG Canadá – suelo agrícola (mg/kg)
Antimonio (Sb)	–	20
Arsénico (As)	*50	*12
Cadmio (Cd)	1.4	1.4
Cromo (Cr)	–	64
Cobre (Cu)	–	63

Nota. En la tabla muestra valores de parámetros como cobre que no están en el ECA-suelo sino normativa Internacional, extraído de CEQG: Canadian Enwonmental Quahty Guidehnes (Normas de Calidad Ambiental Canadienses) y ECA: Entandares de condición Ambiental.

2.3. Marco conceptual

2.3.1. Suelo

El suelo constituye un material no consolidado que se extiende desde la superficie terrestre hasta diferentes estratos de profundidad, conformado por partículas minerales, componentes orgánicos, fase líquida, fase gaseosa y organismos biológicos (Gómez Navarro & Galdames, 2017).

2.3.2. Suelo contaminado

Suelo que presenta compuestos contaminantes incorporados por actividades antropogénicas, modificando su composición química original (MINAM, 2023).

2.3.3. Disposición final de residuos sólidos

La soltura final es el proceso de deposición controlada y definitiva de remanentes en lugares considerados, como rellenos sanitarios o celdas de seguridad. En el caso de los RCD, cuando no es posible su valorización, se requiere un sitio de disposición que cumpla con criterios técnicos para evitar contaminación de suelos, agua y aire (MINAM, 2017).

2.3.4. Metales pesados

Elementos químicos con elevada densidad y masa atómica pueden resultar perjudiciales para los seres vivos. Entre los metales pesados representativos se encuentran el Hg, Pb, Cd, As, Cr y Cu (Basta, 2005).

2.3.5. Plomo

Plomo es un metal nocivo y un contaminante en el suelo que puede provenir de fuentes naturales (como minerales) o de diligencias personales (como la pintura, la gasolina con plomo, la industria y ciertos pesticidas). Cuando el plomo contamina el suelo, es muy persistente, no se disuelve ni se lava con el tiempo y puede ser peligroso para la sanidad, primordialmente para los infantes (Trelles P A & García López, 2022).

2.3.6. Cobre

El cobre es un elemento metálico de tonalidad rojiza que exhibe una elevada conductividad térmica y eléctrica, siendo únicamente superado en conducción de calor por el oro y en transmisión eléctrica por la plata. El Cu en superficie es un micronutriente esencial para vegetales, que lo absorben para sus funciones de crecimiento y desarrollo, aunque solo lo necesitan en pequeñas cantidades (Uriña, 2022).

2.3.7. Cadmio

El cadmio es un elemento metálico carente de función biológica conocida y presenta toxicidad incluso en concentraciones moderadamente bajas. Este metal altera la estructura de las comunidades microbianas edáficas y, en consecuencia, disminuye la tasa de descomposición de los compuestos orgánicos. Tiene la capacidad de bioacumularse en tejidos vegetales y en la fauna del suelo, así como en animales superiores mediante el consumo de forrajes o aguas contaminadas (Torres Quispe N. E., 2018).

2.3.8. pH

El pH constituye un indicador del carácter ácido o básico de una sustancia, representado en una escala numérica de 0 a 14. Un valor de 7 se considera neutro, las cifras inferiores a este umbral denotan acidez, y las superiores reflejan alcalinidad. Esta determinación se fundamenta en la concentración de iones hidrógeno (H^+) presentes en una disolución (Van der Ent A. B., 2013).

2.3.9. Conductividad eléctrica

Se precisa como lo contrario de la resistencia eléctrica y es una régimen de cuán fácilmente los electrones (en sólidos) o los iones (en líquidos) pueden moverse y transportar carga eléctrica. Los metales, por ejemplo, tienen una alta conductividad eléctrica debido a la facilidad con la que se mueven sus electrones, mientras que los aislantes como el vidrio tienen una conductividad muy baja (Yan, et al., 2020).

2.3.10. Remoción

Ambientalmente se conceptualiza como la remoción o transferencia de un compuesto de un sitio a otro; particularmente cuando dicha sustancia presenta características contaminantes y genera impactos severos en el ecosistema, como aquellos que pueden comprometer la salud y el equilibrio de las especies vegetales, animales y humana, debido a su exposición directa con el agente (Liu, 2020).

2.3.11. Fitorremediación

La biorremediación vegetal constituye una tecnología in situ no invasiva y económicamente accesible que emplea especies vegetales para la rehabilitación de suelos contaminados, fundamentándose en la activación de microbiota degradadora. Esta metodología implica la utilización de plantas, sus microorganismos asociados o enzimas, complementada con prácticas agronómicas específicas, para descomponer, inmovilizar o reducir a concentraciones inocuas los contaminantes ambientales mediante procesos que permiten restaurar la matriz afectada o estabilizar los compuestos tóxicos (Montano, Tapia, Fow, & Fuentealba, 2022).

2.3.12. Humus de lombriz

Producto orgánico estabilizado resultante de la biotransformación de residuos por lombrices y microbiota asociada, compuesto por ácidos húmicos y fúlvicos, complejos húmico-minerales y biomasa microbiana activa. Se caracteriza por baja relación C/N, pH cercano a neutro, alta CIC y una fracción coloidal que optimiza la estructura y cabida de retención de la superficie (Ortiz Dongo, Pérez Porras, & Solórzano Acosta, 2023) .

2.3.13. Enmiendas orgánicas

Materia orgánica estabilizada o semi estabilizada que se mezcla a la superficie con el fin principal de optimizar sus particularidades físicas, químicas y biológicas, más que aportar nutrientes de acción rápida (eso es propio de los fertilizantes). Su efecto es paulatino y acumulativo (Ortiz Dongo, Pérez Porras, & Solórzano Acosta, 2023).

TESIS UANCV
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN
"OFICINA DE INVESTIGACIÓN"

CAPITULO III

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. Diseño de investigación

El esquema del proyecto es de tipo experimental, se manipularon deliberadamente variables independientes (tipo de suelo y especie planta) para observar sus efectos sobre la variable dependiente (concentración de Pb, Cd y Cu). Se uso un esquema al azar (DCA) con arreglo factorial 2×2, considerando dos especies vegetales (Stipa ichu y Festuca dolichophylla) y dos tratamientos (suelo con Humus y suelo sin Humus).

Se incluyeron dos controles sin planta: uno con Humus y otro sin Humus, empleados como referencia de atenuación abiótica. El ensayo se desarrolló en 14 unidades experimentales (baldes) distribuidos de la siguiente manera:

- Stipa ichu: 3 baldes con Humus (T1) y 3 sin Humus (T0).
- Festuca dolichophylla: 3 baldes con Humus (T1) y 3 sin Humus (T0).
- Controles sin planta: 1 balde con Humus (T1) y 1 sin Humus (T0).

OFICINA DE INVESTIGACIÓN
Tesis Publicada con autorización del autor
http://repositorio.uancv.edu.pe/

El monitoreo de las plantas se realizó durante 60 días, con muestreos de suelo a los 0, 30 y 60 días, siguiendo el protocolo propuesto por Cadillo (2020).

3.2. Tipo de investigación

La clase del proyecto es aplicada, ya que busca generar soluciones prácticas y sostenibles para la recuperación de superficies poleadas por metales pesados por técnicas de fitorremediación, el estudio aplicado tiene como propósito atender dificultades concretos en contextos específicos utilizando conocimiento científico (Hernández Sampieri, Fernández Collado, & Baptista Lucio, 2021).

3.3. Nivel de investigación

El estudio se desarrolló en el nivel explicativo, puesto que se estableció una relación causal mediante la implementación de una intervención (fitorremediación - variable independiente) y la evaluación de sus efectos en la disminución de la contaminación del suelo en el botadero de Cancharani - variable dependiente.

3.4. Enfoque de investigación

La investigación adopta un paradigma cuantitativo, sustentado en la recopilación y procesamiento de datos numéricos derivados de mediciones experimentales de los niveles de metales pesados (Pb, Cd y Cu) en el suelo. Esta metodología posibilita determinar relaciones de causalidad entre las variables independientes (especies vegetales) y la variable dependiente (concentración de elementos metálicos en el suelo del vertedero de Cancharani) (Hernández Sampieri, Fernández Collado, & Baptista Lucio, 2021).

3.5. Diseño estadístico

Se uso un esquema al azar (DCA) con dos factores (especie vegetal y tratamiento). Se uso un estudio de varianza bifactorial (ANOVA) para identificar diferencias relevantes entre los tratamientos, seguido de una prueba de Tukey ($p < 0.05$) para la comparación de medias.

3.6. Población y muestra

3.6.1. Población

En el actual estudio, la población está comprendida por los suelos del área total del botadero de Cancharani de la municipalidad distrital de Puno, ubicado en la provincia de Puno, región Puno, la cual es de 4.75 hectáreas de extensión de superficie (Hernández Sampieri, Fernández Collado, & Baptista Lucio, 2021).

3.6.2. Muestra

La muestra radicó en el suelo contaminado recolectado en tres puntos representativos del área, a una profundidad de 0 a 20 cm. Las submuestras se homogenizaron para formar una muestra compuesta utilizada en los tratamientos. El muestreo fue de clase no probabilístico por conveniencia, para hacer las pruebas en la etapa experimental, así como también al número de unidades experimentales, la cual fue de 210 kg por punto y 1.5 gr para análisis de laboratorio, de suelo contaminado. Asimismo, se recolectó suelo no contaminado de una zona alejada del botadero para utilizarlo como control (Hernández Sampieri, Fernández Collado, & Baptista Lucio, 2021).

3.7. Materiales y equipos

Para la ejecución del actual estudio fue necesario contar con materiales y equipos especializados que permitieran la cogida, conservación y estudio de ejemplares de suelo del botadero de Cancharani.

a. Materiales

- Stipa ichu.
- Festuca dolichophylla.
- Humus.
- Cooler.
- Bolsas ziploc.
- Pala.
- Pico.
- Bolsas Polietileno.
- Tablero.
- Cinta.
- Balde.
- Plastico.
- Sacos.

b. Equipos

- GPS.
- Balanza.
- Cinta métrica.
- Cámara fotográfica.
- Equipo de cómputo.
- Equipo de protección personal (EPP).

3.8. Técnicas e instrumentos

Los métodos e instrumentos usados en estudio se realizaron tanto en campo y laboratorio mediante ensayos de fitorremediación de suelos aledaños al botadero de Cancharani.

3.8.1. Técnicas

Se aplicaron las siguientes técnicas:

- ✓ **Observación directa:** Se utilizó para identificar los puntos aleatorios para tomar las muestras aledañas al botadero.
- ✓ **Muestreo de suelo:** se usó el método de muestreo aleatorio.
- ✓ **Análisis físico -químico:** Se terminaron el pH y conductividad eléctrica.
- ✓ **Análisis químico:** Se ejecutaron los análisis de metales pesados de Pb, Cd y Cu en los suelos aledaños al vertedero de Cancharani en el l Laboratorio de Análisis Químico Ambiental - LAQUAMEQ E.I.R.L.
- ✓ **Ensayos de fitorremediación:** El establecimiento de las plantas en macetas.
- ✓ **Procesamiento de datos:** Recolección de los hallazgos de campo y recinto para analizar y concluir.

3.8.2. Instrumentos

Para la aplicación de las técnicas descritas se usaron los siguientes instrumentos:

- ✓ **Fichas de registro de campo:** Ficha de datos para registro donde se registraron la ubicación y toma de muestras.
- ✓ **Medidor de pH:** Para medir el nivel de ácido y alcalino del suelo muestra.
- ✓ **Conductímetro:** Para estimar la salinidad total del suelo y la concentración de sales.

- ✓ **Espectrofotómetro de absorción atómica:** para las lecturas de Pb, Cd y Cu.
- ✓ **Normas técnicas, registros de obra y guías:** Documentos como el ECA-Suelo y normas internacionales para el caso de cobre.
- ✓ **Hoja de cálculo en Microsoft Excel:** Para procesar los datos, elaborar tablas, gráficos y calcular indicadores relevantes para la investigación.

3.9. Lugar de estudio

La ubicación del botadero Cancharani el sitio de estudio se localiza en el departamento de Puno, distrito de Puno, a una elevación de 3935 metros sobre el nivel del mar. Presenta una precipitación media anual de 750 mm, temperaturas promedio entre 8-10 °C y humedad relativa de 40-60%. El vertedero se sitúa a 8 km del centro urbano de Puno, junto a la vía Puno-Moquegua, en coordenadas UTM E 389903.98 y N 8241621.

Tabla 6

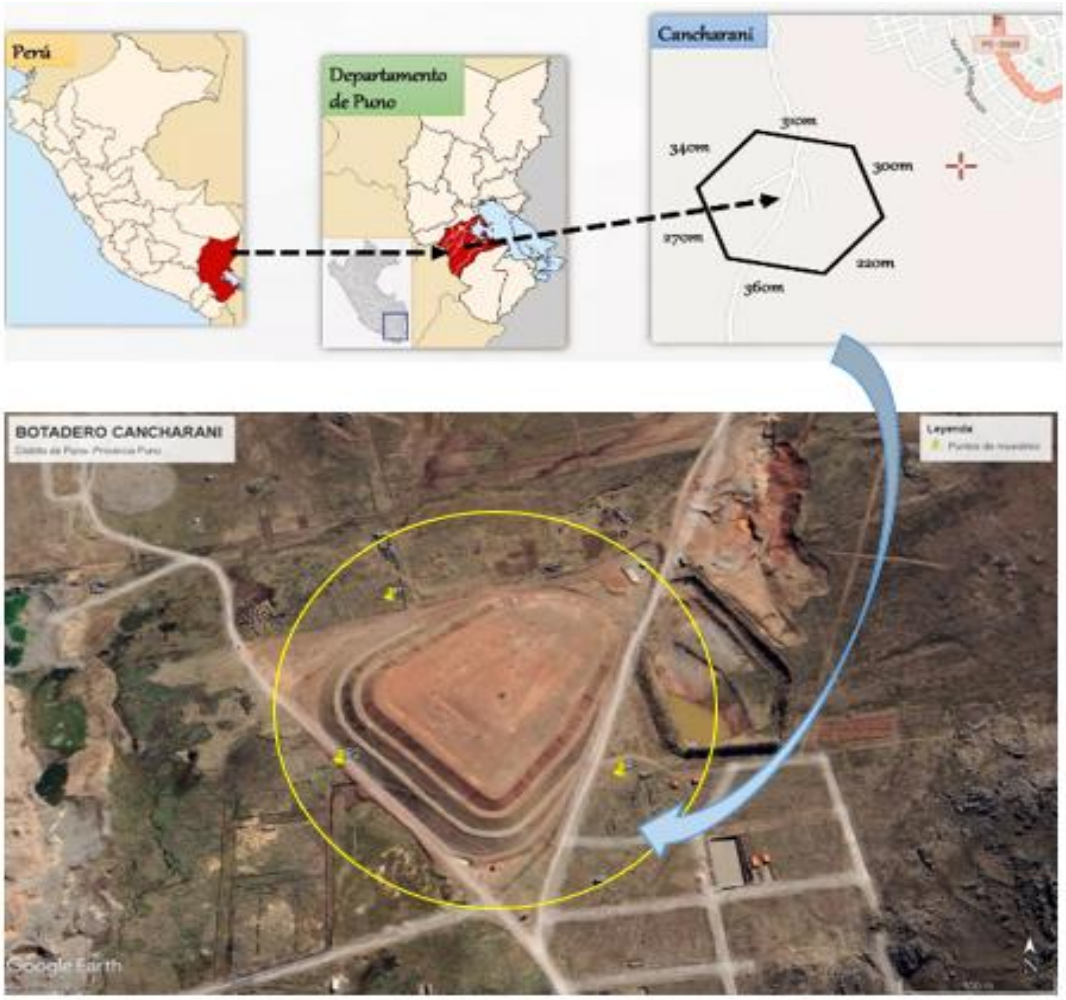
Coordenadas del lugar de estudio – Ubicación del botadero Cancharani en el distrito de Puno.

Código	Coordenadas UTM (WGS 84)		
	Zona	Este	Norte
P – 01	19 L	389805.00 m E	8242766.00 m S
P – 02	19 L	389779.00 m E	8242600.00 m S
P – 03	19 L	389995.00 m E	8242586.00 m S

Nota. Estas coordenadas corresponden al lugar de puntos de muestreo de botadero de Cancharani.

Figura 7

Ubicación de los puntos de muestreo del botadero Cancharani.



Nota. Ubicación geográfica del área de estudio - Google Earth.

El botadero de Cancharani tiene un área total de 4.75 hectáreas equivalente a 47549.76 m2 con un perímetro de 946.98 m.

Así mismo, la ejecución experimental de cada tratamiento de fitorremediación se realizó en una vivienda aledaña al botadero de Cancharani.

3.10. Procedimiento metodológico

3.10.1. Procedimiento para el objetivo específico 1: Caracterizar los suelos aledaños al botadero de Cancharani en términos de pH, conductividad eléctrica y concentración inicial de Pb, Cd y Cu.

El procedimiento metodológico para la determinación de las superficies vecinas al vertedero de Cancharani se desarrolló en tres fases: campo, laboratorio y análisis de datos.

a. Fase de campo:

a.1. Muestreo del suelo contaminado del botadero

El muestreo se realizó el 12 de septiembre de 2025. En esta etapa se delimitó el área de estudio mediante la georreferenciación de los sitios de muestreo usando un receptor GPS, estableciendo 03 puntos de muestreo aleatorio en lugares vecinos al vertedero de Cancharani.

Dada la superficie de 4.75 hectáreas que abarca el vertedero, la cantidad de estaciones de muestreo se estableció conforme a los lineamientos establecidos en la Guía de Muestreo de Suelos del MINAM (D.S N° 002-2013) el método triangular. En cada punto se recolectaron aproximadamente 500 g de suelo, los cuales se homogeneizaron para formar una muestra compuesta representativa del área.

Figura 8

Delimitación y señalización del área de muestreo de suelo aledaño al botadero de Cancharani, Puno – 2025.



La extracción de superficie se realizó a una profundidad de 40 cm, debido a que estudios previos indican que en suelos agrícolas y de disposición final de residuos los metales pesados (Pb, Cd y Cu) tienden a concentrarse entre los 30 y 40 cm de profundidad.

La muestra fue recolectada siguiendo el método triangular de muestreo sistemático, empleando herramientas manuales para obtener suelos representativos de la zona contaminada.

Figura 9

Extracción de ejemplar de suelo a 40 cm de hondura en el área aledaña al botadero de Cancharani, Puno – 2025.



Cada ejemplar fue depositada en bolsas de polietileno transparente, debidamente etiquetadas con información del sitio de origen, número de ejemplar, fecha y código de identificación, para luego ser trasladadas al Laboratorio de Análisis Químico Ambiental (LAQUAMEQ E.I.R.L.), en la ciudad de Puno, garantizando su integridad durante el transporte.

La Figura 10 da el proceso de recolección y almacenamiento de las muestras previo a su traslado al Laboratorio, donde se efectuaron los análisis de pH, conductividad eléctrica y reunión inicial de metales pesados (Pb, Cd y Cu).

Figura 10

Recolección y almacenamiento de ejemplares de superficie para su traslado al laboratorio LAQUAMEQ E.I.R.L., Puno – 2025.



Las muestras fueron rotuladas y acondicionadas en contenedores herméticos, asegurando su integridad y trazabilidad antes del análisis fisicoquímico y de metales pesados.

b. Fase de laboratorio

En el recinto, los ejemplares son secadas al aire libre a temperatura ambiente (±25 °C), trituradas suavemente y tamizadas por un tamiz de 2 mm de diámetro para obtener una fracción homogénea de análisis.

Posteriormente, se establecio el pH y la conductividad eléctrica (CE) empleando un equipo multiparámetro portátil marca HANNA HI-5521.

Para la cuantificación de metales pesados (Pb, Cd y Cu), se aplicó la metodología de digestión ácida con una mezcla HNO_3-HCl (3:1), de acuerdo con la norma EPA 3050B. Las reuniones de los metales fueron establecidas por espectrofotometría de absorción atómica (AAS) en el Laboratorio LAQUAMEQ E.I.R.L., expresadas en mg/kg de suelo seco.

c. Fase de análisis de datos

Los resultados hallados son sistematizados en hojas de cálculo (Microsoft Excel 2021) y confrontados ECA para suelos agrícolas impuestos en el D.S. N° 011-2017-MINAM, a fin de imponer el nivel de contaminación y la condición del suelo en la zona de estudio. Asimismo, se fabricaron tablas y gráficos relativos que reflejaron los valores medios de pH, conductividad eléctrica y reunión inicial de Pb, Cd y Cu en las superficies aledaños al vertedero de Cancharani.

3.10.2. Procedimiento para el objetivo específico 2: Implementar ensayos de fitorremediación bajo condiciones controladas utilizando *Stipa ichu y Festuca dolichophylla* con y sin adición de Humus.

El presente procedimiento metodológico se orientó a examinar la cabida fitorremediadora de las especies altoandinas *Stipa ichu y Festuca dolichophylla* frente a superficies poleadas con metales pesados (Pb, Cd y Cu) origen del vertedero de Cancharani, en la región de Puno. La elección de estas especies responde a su resiliencia ecológica, amplia distribución altitudinal y capacidad de adaptación a suelos degradados, particularidades que las posicionan como aspirantes idóneas para técnicas de restauración ambiental mediante fitorremediación.

a. Fase experimental

La fase experimental se hizo bajo situaciones naturales a la intemperie, con el fin de examinar la cabida de fitorremediación de *Stipa ichu y Festuca dolichophylla* frente a superficies poluadas con metales pesados (Pb, Cd y Cu). Se trabajó con 14 unidades experimentales (baldes plásticos de 20 L de capacidad), distribuidas según el diseño experimental.

- **Selección de especies vegetales**

Las especies *Stipa ichu y Festuca dolichophylla* fueron seleccionadas por a su alta tolerancia a situaciones edáficas hostiles (baja fertilidad, pH variable y presencia de metales), así como por su cabida potencial para juntar metales pesados en raíces y parte aérea, en estudios realizados en ecosistemas altoandinos.

- **Diseño experimental**

Cada especie se asignó a dos tratamientos, con tres repeticiones por tratamiento:

- T0: Suelo contaminado sin Humus.
- T1: Suelo contaminado con adición del 10% de Humus (base peso/peso).

Asimismo, se incluyeron dos unidades de control sin planta, una con Humus (C1) y otra sin Humus (C0), con la finalidad de imponer la reducción natural de metales pesados sin intervención vegetal. El diseño final se abrevia en la siguiente tabla:

Tabla 7

Diseño de experimental de los ensayos de fitorremediación.

Grupo	Tratamiento	Descripción	Nº de réplicas	Total, de baldes
Stipa ichu	T0	Suelo contaminado sin Humus	3	3
Stipa ichu	T1	Suelo contaminado + 10% Humus	3	3
Festuca dolichophylla	T0	Suelo contaminado sin Humus	3	3
Festuca dolichophylla	T1	Suelo contaminado + 10% Humus	3	3
Control sin planta	C0	Suelo contaminado sin Humus	1	1
Control sin planta	C1	Suelo contaminado + 10% Humus	1	1
TOTAL GENERAL				14

Nota. Es el esquema experimental de las pruebas de fitorremediación que se realizó en baldes de 20 L en una vivienda aledaña a botadero Cancharani.

En la tabla 7, se incluyeron controles sin planta (C0 y C1) con una réplica biológica por tratamiento debido a restricciones logísticas.

Para fortalecer la calidad de datos, cada control se muestreo mediante submuestreo compuesto y se realizaron replicas analíticas independientes. Los análisis inferenciales se enfocaron en las comparaciones entre especies y tratamientos con plantas; los controles se reportaron como referencia de atenuación abiótica inicial y final.

- **Preparación del suelo y Humus**

Se prepararon de las dos especies con tres repeticiones y con dos blancos con y sin agregado de humus con un ejemplar de 15 kg de superficie del botadero de Cancharani en baldes de 20 litros.

Figura 11

Proceso de fabricación del ejemplar de suelo de los ensayos para la fitorremediación.



En la figura 11 y 12 el Humus utilizado, considerada óptima para favorecer la actividad microbiana. Antes de su aplicación, el Humus fue tamizado y mezclado con el suelo un 10% de humus.

Figura 12

Proceso de preparación de Humus y mezclado con la muestra de suelo.



- **Preparación y establecimiento de los tratamientos**

Se pesaron 15 kg de suelo seco por unidad experimental, donde en los tratamientos con Humus (T1 y C1), se incorporó el 10% en peso de Humus y se mezcló homogéneamente. También se colocó el suelo tratado en baldes de 20 L con orificios inferiores para drenaje. Posteriormente se trasplantaron plántulas sanas y uniformes de Stipa ichu y Festuca dolichophylla con una altura inicial promedio de 15 – 16 cm, este proceso de experimentación fue llevada a cabo en aire libre en la misma zona del distrito de Puno para no variar con la temperatura como se muestra en la figura 13.

Figura 13

Proceso de trasplantación de plántulas sanas y uniformes de Stipa ichu y Festuca dolichophylla.



- **Condiciones de cultivo y mantenimiento**

Durante los 60 días del ensayo, se mantuvieron al aire libre y humedad constante mediante riego periódico con agua destilada, evitando la introducción de contaminantes externos. No se aplicaron fertilizantes ni productos químicos.

Figura 14

Proceso de monitoreo y riego de las plantas de estas dos especies.



- **Monitoreo de crecimiento vegetal**

Se evaluaron variables de crecimiento a intervalos de 30 días, incluyendo:

- Altura promedio de las plantas (cm).

Estos parámetros sirvieron para determinar la tolerancia fisiológica de las especies frente a la carga de metales pesados.

- **Muestreo de suelo durante el experimento**

Se cogieron ejemplares de superficie en tres momentos: Día 1 (inicio), Día 30, y Día 60. Cada muestra fue secada al aire, tamizada y almacenada en recipientes estériles para su análisis químico posterior, determinándose la reunión disponible de Pb, Cd y Cu en el Laboratorio de Análisis Químico Ambiental - LAQUAMEQ E.I.R.L.

Figura 15

Proceso de recolección de la muestra de cada ensayo y según cada especie de fitorremediación.



- **Evaluación final**

Al término de los 60 días, se analizaron el suelo de cada tratamiento de fitorremediación de las especies de *Stipa ichu y Festuca dolichophylla* con el objetivo de calcular la eficacia de separación de los metales pesados cada tratamiento.

3.10.3. Procedimiento para el objetivo específico 3: Determinar la eficiencia de remoción de Pb, Cd y Cu en el suelo por efecto de cada especie y tratamiento

La determinación de eficacia de separación de metales pesados (Pb, Cd y Cu) se realizó con el propósito de evaluar la cabida de las tipos de vegetales *Stipa ichu y Festuca dolichophylla* para remover estos elementos en el suelo, tanto en presencia como en ausencia de Humus y sin Humus. Este procedimiento constituye la fase analítica del estudio, permitiendo cuantificar el efecto de la fitorremediación bajo las condiciones experimentales previamente establecidas.

- **Preparación y procesamiento de muestras**

Una vez finalizado el periodo experimental (60 días), se procedió al muestreo final de suelo y biomasa vegetal en cada unidad experimental:

Muestras de suelo: Se extrajeron aproximadamente 15kg de suelo por balde inicialmente donde se realizaron 14 baldes de tratamientos con dos tipos de vegetales *Stipa ichu y Festuca dolichophylla,* de las cuales de cada tratamiento se tomó 500 gramos de muestra homogénea para realizar análisis de Pb, Cd y Cu en superficie por efecto de cada especie y

tratamiento, se transportaron al recinto de condición ambiente de la UANCV. Cada muestra se rotuló correctamente y almacenó en sacos de polietileno selladas para su posterior análisis químico.

- **Cálculo de la eficiencia de remoción**

Para cuantificar la capacidad de remoción de los metales pesados del suelo, se utilizó la siguiente expresión:

$$\textbf{Eficiencia de remoción (\%)} = \frac{Ci - Cf}{Ci} x\ 100$$

Donde:

- Ci = reunión inicial del metal en superficie(mg/kg)
- Cf = reunión final del metal en superficie después del experimento (mg/kg)

Este cálculo se aplicó para cada metal (Pb, Cd, Cu) y para cada tratamiento (T0, T1, C0, C1).

TESIS UANCV
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN
"OFICINA DE INVESTIGACIÓN"

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Resultados

4.1.1. Caracterizar los suelos aledaños al botadero de Cancharani en términos de pH, conductividad eléctrica y concentración inicial de Pb, Cd y Cu.

El análisis de superficies recolectados en los contornos del vertedero de Cancharani permitió determinar los parámetros físico-químicos básicos (pH y conductividad eléctrica) y las reuniones iniciales de los metales pesados Pb, Cd y Cu, los cuales constituyen indicadores relevantes del grado de polución antrópica en el lugar.

OFICINA DE INVESTIGACIÓN
Tesis Publicada con autorización del autor
http://repositorio.uancv.edu.pe/

a) Parámetros fisicoquímicos del suelo:

Tabla 8

Resultado de pH y conductividad del suelo aledaño al botadero de Cancharani, Puno – 2025.

Puntos	PH	Conductividad	Clasificación del suelo
P1	6.5	680	Ligeramente ácido – salinidad moderada
P2	6.8	540	Ligeramente ácido – baja salinidad
P3	7.2	350	Neutro – baja salinidad
Promedio	6.8	523	Ligeramente ácido – salinidad baja
Testigo Fuera	6.8	230	Neutro – no afectado

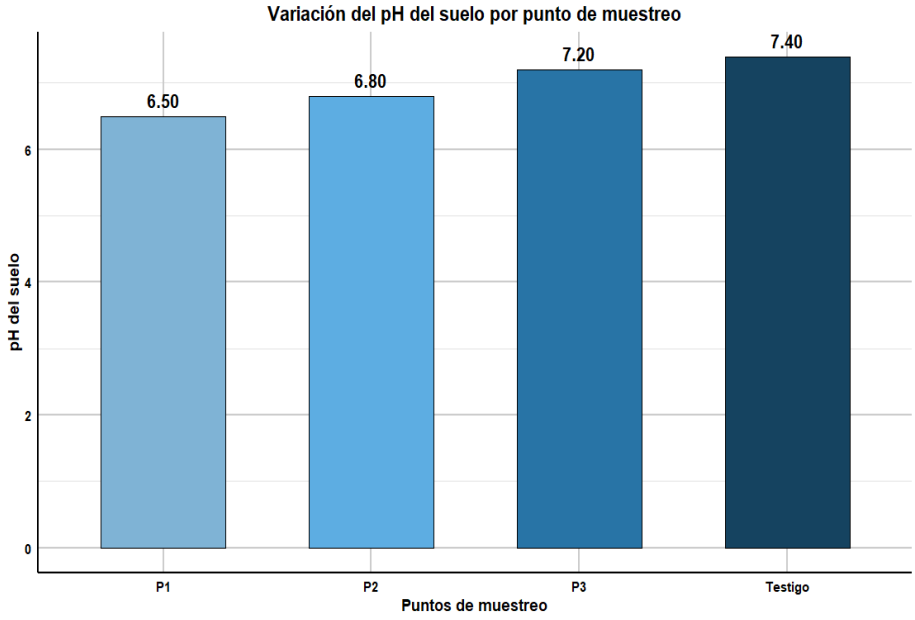
Nota. La tabla presenta los valores promedio de pH y conductividad eléctrica hallados en los suelos muestreados en tres puntos representativos del botadero y un punto testigo alejado de la zona fuera del botadero, resultados del Laboratorio de Análisis Químico Ambiental - LAQUAMEQ E.I.R.L.

En la tabla 8, se observa los hallazgos de superficies aledaños al botadero de Cancharani, en donde presentan un pH promedio de 6.8, lo que indica una condición ligeramente ácida, característica de suelos con cierta influencia de residuos orgánicos y lixiviados. En cuanto a la CE, los valores oscilaron entre 350 y 680 µS/cm, clasificando los suelos como de baja a moderada salinidad, lo que sugiere una acumulación limitada de sales solubles en el perfil superficial. El punto 1 (P1) evidenció la mayor salinidad (680 µS/cm), probablemente

asociada a la infiltración de lixiviados procedentes del botadero, mientras que el punto 3 (P3) presentó condiciones más neutras y menor conductividad, reflejando una menor influencia de la zona de disposición final. En comparación, el testigo (6.8 pH; 230 µS/cm), ubicado fuera del área de impacto, mostró un suelo neutro y no afectado, lo cual confirma la alteración química parcial del suelo en las zonas próximas al botadero, atribuible a la migración de contaminantes y a la actividad antrópica constante en el entorno.

Figura 16

Variación del pH del suelo por punto de muestreo.

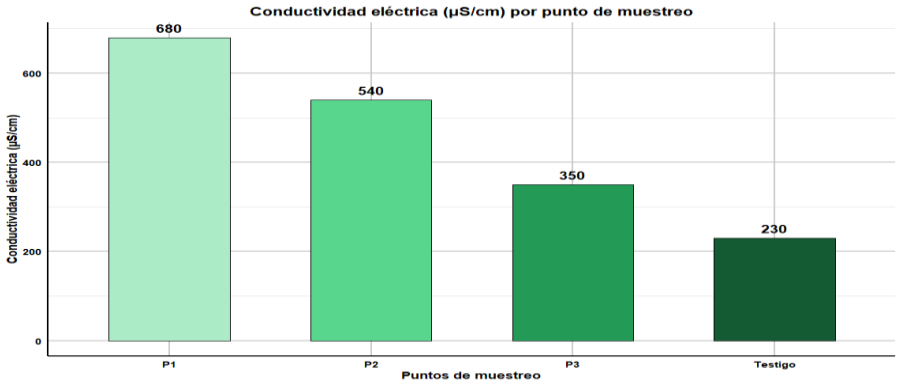


En la figura 16, se fija el pH de superficies aledaños al vertedero de Cancharani varía entre 6.5 y 7.4, presentando valores próximos a la neutralidad. El punto P1 mostró el valor más bajo (pH 6.5), lo que sugiere una ligera acidez posiblemente asociada a la existencia de lixiviados ácidos derivados de la desintegración orgánica de residuos. Por otro lado, el testigo presentó el valor más alto (pH 7.4), indicando menor influencia antrópica.

Este rango de pH (6.5–7.4) es típico de suelos con cabida media de retención y movilidad de metales pesados, donde la adsorción de iones metálicos disminuye a medida que el pH se acerca a la neutralidad. La ligera acidez en los puntos próximos al botadero favorece la solubilización del Cd y Cu, facilitando su movilidad y posible absorción por las plantas (Diaz Hoyos & Peralta Rodriguez, 2017).

Figura 17

Conductividad eléctrica (µS/cm) por punto de muestreo.



En la figura 17, se fija que la CE varía entre 230 y 680 µS/cm, siendo el valor más elevado en el punto P1 (680 µS/cm) y el más bajo en el testigo (230 µS/cm). Este comportamiento evidencia un gradiente de salinidad decreciente con la distancia al botadero, lo cual refleja el efecto de lixiviados con contenido de sales disueltas, provenientes de residuos domésticos y hospitalarios.

Según Gómez Navarro & Galdames (2017), los valores de CE entre 400 y 700 µS/cm corresponden a suelos con salinidad baja a moderada, lo que puede afectar la disponibilidad de nutrientes y modificar la estructura de superficie. Estos resultados corroboran la influencia directa del botadero en la alteración de las propiedades fisicoquímicas del entorno inmediato.

b) Concentración de Plomo en los suelos del botadero:

Tabla 9

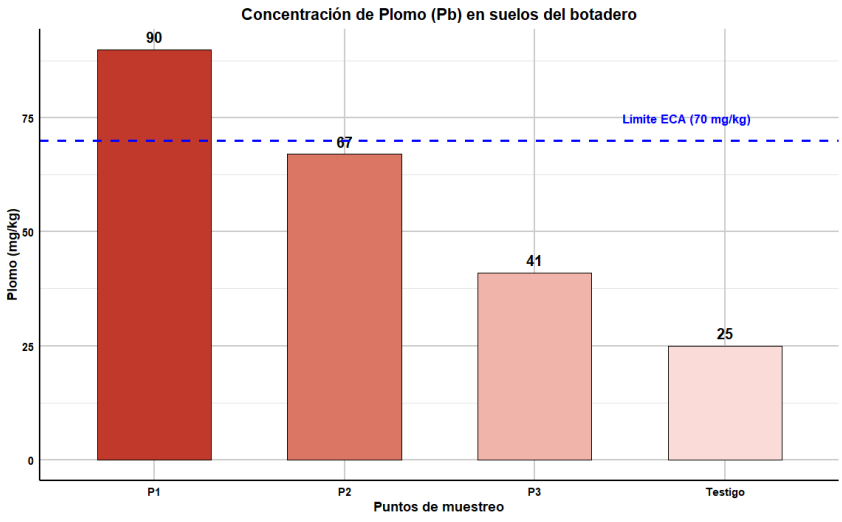
Resultado de la concentración de Plomo.

Puntos	Unidad de medida	Concentración de Pb
P1	mg/kg	90
P2	mg/kg	67
P3	mg/kg	41
Testigo fuera del área	mg/kg	25

Nota. Los valores corresponden a la reunión de plomo total en superficie, expresada en mg/kg (base seca), reportados por el laboratorio para los sitios de muestreo P1, P2, P3 y un testigo ubicado fuera del área de intervención, resultados del Laboratorio de Análisis Químico Ambiental - LAQUAMEQ E.I.R.L.

Figura 18

Concentración de Plomo (Pb) en suelos del botadero y ECA-Suelo.



En la tabla 9 y figura 18, se fija que las concentraciones de plomo (Pb) oscilaron entre 25 y 90 mg/kg, siendo el valor máximo registrado en el punto P1, el más cercano al botadero. Este resultado supera poco el límite fijado por el ECA del MINAM (70 mg/kg) para suelos agrícolas, indicando una contaminación moderada por este metal. La elevada concentración en P1 puede atribuirse al vertimiento de residuos metálicos, baterías y restos de pinturas, comunes en vertederos sin control. La disminución progresiva de Pb en P2, P3 y el testigo sugiere una disminución del impacto con la distancia, coherente con la dispersión limitada de este elemento en suelos arcillosos.

c) Concentración de cadmio en los suelos del botadero:

Tabla 10

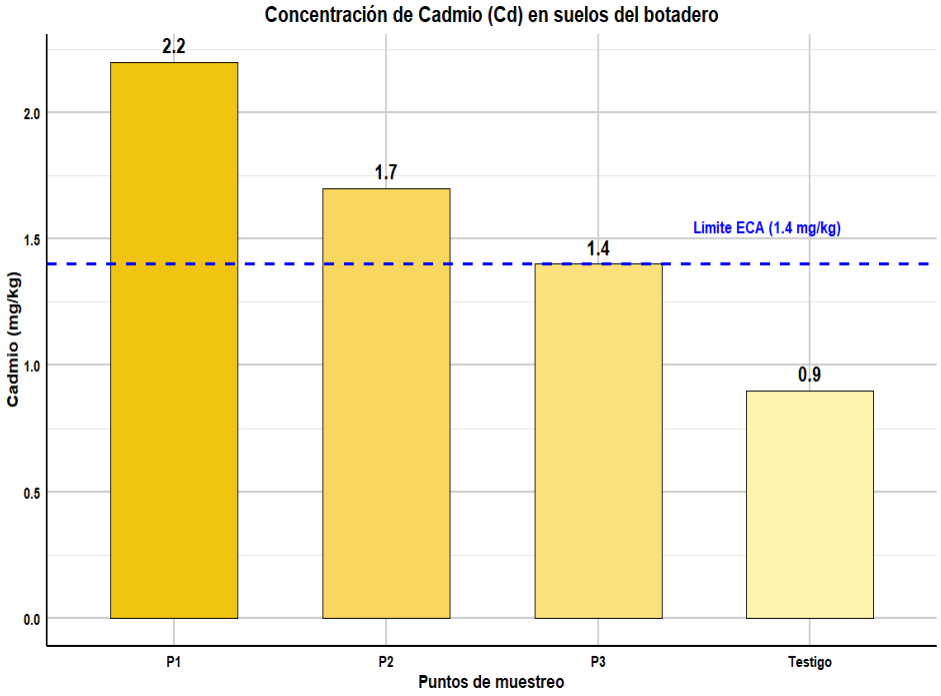
Resultado de la concentración de Cadmio.

Puntos	**Unidad de medida**	**Concentración de Cd**
P1	mg/kg	2.2
P2	mg/kg	1.7
P3	mg/kg	1.4
Testigo fuera del área	mg/kg	0.8

Nota. La tabla presenta los valores de cadmio total expresados en mg/kg, resultados del Laboratorio de Análisis Químico Ambiental - LAQUAMEQ E.I.R.L.

Figura 19

Concentración de Cadmio (Cd) en suelos del botadero y ECA-Suelo.



En la tabla 10 y figura 19, se aprecia que el cadmio (Cd) varía entre 0.9 y 2.2 mg/kg, pasando el límite autorizado por el ECA (1.4 mg/kg) en los puntos P1 y P2. Este resultado confirma la presencia significativa de contaminación por cadmio en los sectores más próximos al foco emisor, posiblemente originada por residuos electrónicos, plásticos y pilas desechadas.

El Cd es uno de los elementos más nocivos y móviles en superficie, pudiendo incorporarse fácilmente a la biota, valores superiores a 1.5 mg/kg representan un riesgo potencial de bioacumulación en plantas y organismos edáficos. La tendencia decreciente hacia el testigo indica un comportamiento típico de contaminación puntual, con dispersión limitada y controlada por la topografía y drenaje superficial.

d) Concentración de cobre en los suelos del botadero:

Tabla 11

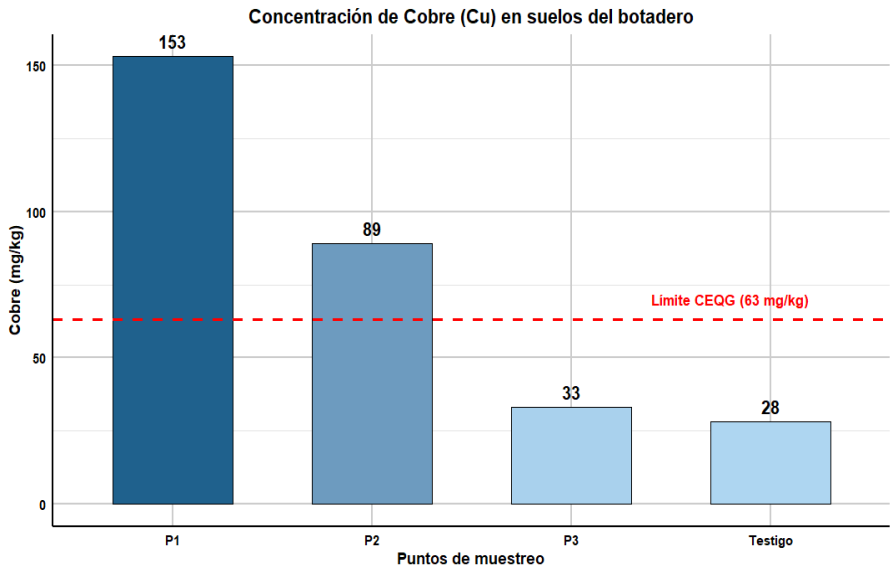
Resultado de la concentración de Cobre (Cu) en los suelos.

Puntos	Unidad de medida	Concentración de Cu
P1	mg/kg	153
P2	mg/kg	89
P3	mg/kg	33
Testigo fuera del área	mg/kg	27

Nota. La tabla presenta los valores de cobre total expresados en mg/kg, resultados del Laboratorio de Análisis Químico Ambiental - LAQUAMEQ E.I.R.L.

Figura 20

Concentración de Cobre (Cu) en suelos del botadero y ECA-Suelo.



En la tabla 11 y figura 20, se fija que las reuniones de cobre (Cu) presentan valores comprendidos entre 28 y 153 mg/kg, con un máximo en el

punto P1, superando ampliamente el límite del ECA (63 mg/kg). Esta acumulación puede asociarse a residuos de cables eléctricos, metales de construcción y lixiviados industriales.

El cobre, aunque es un micronutriente esencial, a concentraciones superiores a 100 mg/kg puede ser fitotóxico, afectando el crecimiento radicular y la actividad microbiana del suelo (Bourg, 1995). Los resultados reflejan una fuerte influencia del botadero sobre la calidad edáfica y una posible alteración del equilibrio biogeoquímico del área afectada.

e) Resultados de concentraciones totales de Pb, Cd y Cu en comparación al ECA-suelo

Tabla 12

Concentraciones totales iniciales de metales en suelo (mg/kg) promedio y comparación con standard MINAM (ECA suelo).

Metal	P1	P2	P3	Testigo	Límite MINAM (mg/kg)
Pb	90	67	41	25	70
Cd	2.2	1.7	1.4	0.8	1.4
Cu	153	89	33	27	63

Nota. La tabla de los hallazgos del Laboratorio de Estudio Químico Ambiental - LAQUAMEQ E.I.R.L, de los elementos pesados las concentraciones de Pb, Cd y Cu en los puntos evaluados y su cotejo con los Patrones de Condición Ambiental del MINAM (2017) para superficies agrícolas.

La tabla 12, muestra que los elementos pesados Pb, Cd y Cu superan los límites permisibles en los puntos más próximos al botadero (P1 y P2), mientras que en el punto P3 y el testigo los valores tienden a la normalidad.

En conjunto, los resultados evidencian una gradiente de contaminación decreciente con la distancia, con acumulación significativa de Cu y Cd en las zonas más próximas. Este patrón confirma la influencia directa de la destreza impropia de remanentes sólidos urbanos e industriales en el suelo.

4.1.2. Implementar ensayos de fitorremediación bajo condiciones controladas utilizando Stipa ichu y Festuca dolichophylla con y sin adición de Humus.

Se establecieron 14 unidades experimentales en invernadero: Stipa ichu (T0 = sin Humus, T1 = +10% Humus) y Festuca dolichophylla (T0/T1) con 3 réplicas por tratamiento más dos controles sin planta (C0 sin Humus, C1 con Humus). El ensayo duró 60 días; se realizaron muestreos al inicio (día 0), día 30 y una evaluación final al día 60 para medir: reuniones de Pb, Cd y Cu en superficie. Los estudios químicos se hicieron en recinto. Los exámenes químicos se hicieron en el recinto de Análisis Químico Ambiental - LAQUAMEQ E.I.R.L.

a) Crecimiento vegetal y biomasa:

En esta época del examen se tasó el crecimiento vegetal y la biomasa seca final de los tipos empleados en el mnetodo de fitorremediación (Stipa ichu y Festuca dolichophylla) bajo las condiciones experimentales establecidas. El monitoreo se realizó durante el periodo de exposición de las plantas (0–60 días), registrando las alturas iniciales y finales de cada especie según los tratamientos con y sin adición de

humus de lombriz (10%), así como los controles sin planta. Estos valores permitieron fijar la influencia de la enmienda orgánica en el progreso vegetativo y en la adaptación de las especies a los suelos contaminados con Pb, Cd y Cu.

Tabla 13

Crecimiento promedio y biomasa seca final por tratamiento

Especie	Tratamiento	Altura inicial (cm)	Altura final (cm)
Stipa ichu	T0 (sin Humus)	15 - 16	16.50 – 18.0
Stipa ichu	T1 (+10% Humus)	15 – 17	21.50 – 22.0
Festuca dol.	T0 (sin Humus)	16 – 18	18.4 – 20.1
Festuca dol.	T1 (+10% Humus)	16 - 17	23.0 – 25.6
Control (sin planta)	C0	—	—
Control (con Humus)	C1	—	—

Nota. La tabla presenta la cuantificación de crecimientos de las especies de fitorremediación registrados en campo - ficha técnica.

En la tabla 13, se muestra los promedios de tus rangos, el humus al 10% impulsó claramente la altura y el crecimiento de ambas gramíneas: en Stipa ichu, T0 partió de 15.5 cm y terminó en 17.25 cm (creció 1.75 cm), mientras que T1 inició en 16.0 cm y alcanzó 21.75 cm (creció 5.75 cm), con una altura final superior a T0 en 4.50 cm; en Festuca dolichophylla, T0 fue de 17.0 a 19.25 cm (creció 2.25 cm) y T1 de 16.5 a 24.30 cm (creció 7.80 cm), superando a T0 en 5.05 cm de altura final. Este patrón indica que la enmienda con humus alivió limitaciones del sustrato

(agua y nutrientes), favoreciendo mayor elongación y desarrollo aéreo, con Festuca mostrando el mayor incremento absoluto en altura; los controles C0 y C1 no incluyen planta y sirven solo para contrastar el efecto del sustrato.

b) Evolución de las concentraciones en suelo (1, 30, 60 días):

El monitoreo de la reunión de elementos pesados (Pb, Cd y Cu) se hizo a los 1, 30, y 60 días del experimento, tanto para los tratamientos con planta (Stipa ichu y Festuca dolichophylla, con y sin Humus) como para los controles sin planta.

Tabla 14

Hallazgos de los parámetros de Inorgánicos (Pb, Cd y Cu) de muestras de suelo de los tratamientos del diseño experimental de fitorremediación con especies de Stipa ichu y Festuca dolichophylla.

Metal	Código	Tratamiento	Día 1	Día 30	Día 60
Pb (mg/kg)	Pb-S0	Stipa T0	80.5	72.3	59.3
	Pb-S1	Stipa T1	81.2	60.4	39
	Pb-F0	Festuca T0	79.5	75.8	64.1
	Pb-F1	Festuca T1	81.1	57	33.2
	Pb-C0	Control C0	79.5	78.9	78.5
	Pb-C1	Control C1	80.0	77.5	74.5
Cd	Cd-S0	Stipa T0	1.88	1.72	1.55
(mg/kg)	Cd-S1	Stipa T1	1.95	1.32	0.98
	Cd-F0	Festuca T0	1.89	1.74	1.6
	Cd-F1	Festuca T1	1.92	1.28	0.92
	Cd-C0	Control C0	1.90	1.89	1.88
	Cd-C1	Control C1	1.93	1.90	1.80
Cu	Cu-S0	Stipa T0	131	120	101
(mg/kg)	Cu-S1	Stipa T1	130	95	58
	Cu-F0	Festuca T0	132	128	110

	Cu-F1	Festuca T1	129	86	49
	Cu-C0	Control C0	131	130	128
	Cu-C1	Control C1	130	120	115

Nota. La tabla da hallazgos del Laboratorio de Estudio Químico Ambiental - LAQUAMEQ E.I.R.L. que es la cuantificación de los ensayos de fitorremediación.

En la tabla 14, se identifica que, a lo largo de sesenta días, los tratamientos con planta y humus mostraron la mayor capacidad de depuración del sustrato para plomo, cadmio y cobre, con un desempeño consistentemente superior en Festuca dolichophylla y muy cercano en Stipa ichu. En plomo, Festuca con humus redujo la concentración desde 81.1 hasta 33.2 mg por kg, una disminución de 47.9 mg por kg, y Stipa con humus desde 81.2 hasta 39.0 mg por kg, una disminución de 42.2 mg por kg. Los tratamientos con planta sin humus lograron reducciones menores: Stipa pasó de 80.5 a 59.3 mg por kg, equivalente a 21.2 mg por kg, y Festuca de 79.5 a 64.1 mg por kg, equivalente a 15.4 mg por kg; los controles mostraron variaciones modestas, con el control con humus reduciendo 5.5 mg por kg y el control sin humus 0.4 mg por kg. En cadmio, Festuca con humus descendió de 1.92 a 0.92 mg por kg, una reducción de 1.00 mg por kg, y Stipa con humus de 1.95 a 0.98 mg por kg, una reducción de 0.97 mg por kg; los tratamientos sin humus disminuyeron 0.33 mg por kg en Stipa y 0.29 mg por kg en Festuca, mientras que los controles apenas variaron 0.13 mg por kg y 0.02 mg por kg. En cobre, Festuca con humus bajó de 129 a 49 mg por kg, una reducción de 80 mg por kg, y Stipa con humus de 130 a 58 mg por kg, una reducción de 72

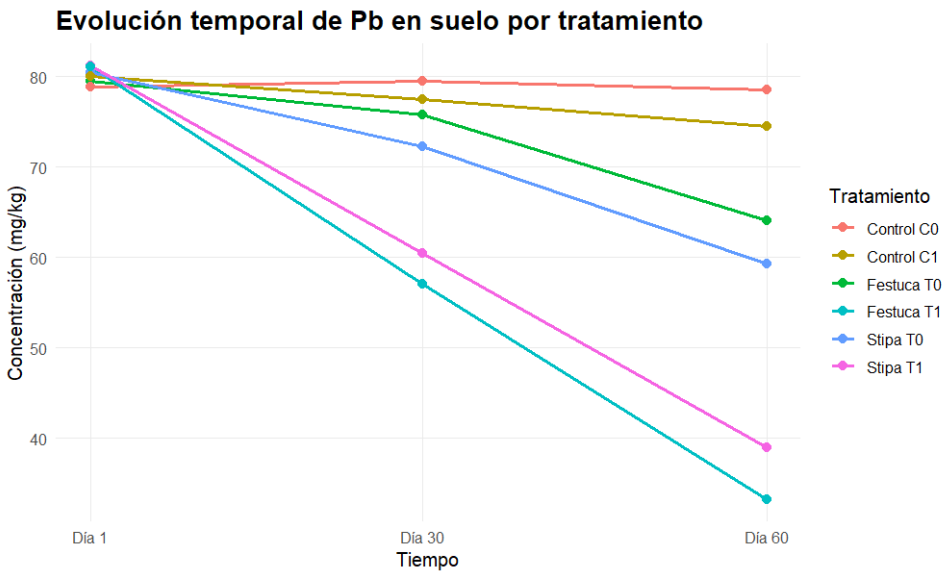
mg por kg; sin humus, las disminuciones fueron de 30 mg por kg en Stipa y 22 mg por kg en Festuca, y en los controles de 15 mg por kg y 3 mg por kg. Además, entre el día treinta y el día sesenta, los tratamientos con humus mantuvieron la tendencia de descenso, con reducciones adicionales en plomo de 23.8 mg por kg en Festuca y 21.4 mg por kg en Stipa, y en cobre de 37 mg por kg en ambas especies, lo que respalda un proceso de depuración sostenido más allá de una sorción inicial de corta duración.

Llegando a la conclusión que el mejor tratamiento más eficientes son; para Stipa ichu, el tratamiento T1 con 10% de humus fue el más eficiente: plomo pasó de 81.2 a 39.0 mg/kg, cadmio de 1.95 a 0.98 mg/kg y cobre de 130 a 58 mg/kg en sesenta días. Para Festuca dolichophylla, también destacó T1 con 10% de humus: plomo pasó de 81.1 a 33.2 mg/kg, cadmio de 1.92 a 0.92 mg/kg y cobre de 129 a 49 mg/kg en el mismo periodo.

Con respecto a cada especie se tiene el mejor tratamiento de cada una de las especies donde; para plomo, cadmio y cobre, el tratamiento más eficiente fue Festuca dolichophylla con humus al diez por ciento en T1: en plomo redujo de 81.1 a 33.2 mg por kg, en cadmio de 1.92 a 0.92 mg por kg y en cobre de 129 a 49 mg por kg, superando a Stipa con humus y a los tratamientos sin humus y controles en cada caso.

Figura 21

Evolución temporal de plomo (Pb) en suelo.

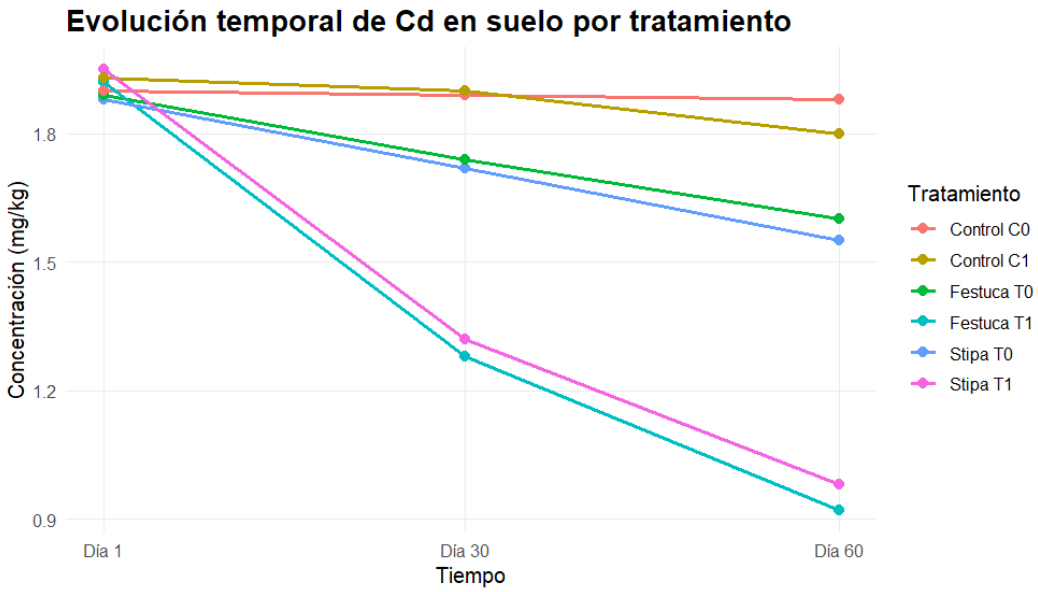


En la figura 21, En la evaluación de Pb en suelo, el tratamiento más eficiente fue Festuca T1 con 10% de humus, que redujo la concentración desde 81.1 hasta 33.2 mg/kg en sesenta días; le siguió Stipa T1 con 10% de humus, desde 81.2 hasta 39.0 mg/kg; los tratamientos sin humus con planta mostraron menores descensos, Stipa T0 desde 80.5 hasta 59.3 mg/kg y Festuca T0 desde 79.5 hasta 64.1 mg/kg; los controles presentaron cambios pequeños, C1 desde 80.0 hasta 74.5 mg/kg y C0 desde 78.9 hasta 78.5 mg/kg. En síntesis, el mejor desempeño corresponde a T1, con clara ventaja de Festuca T1.

La formulación óptima es Festuca T1 con 10% de humus, porque alcanzó la mayor remoción de plomo en sesenta días, pasando de 81.1 a 33.2 mg/kg, superando a Stipa T1 y a todos los tratamientos sin humus y controles.

Figura 22

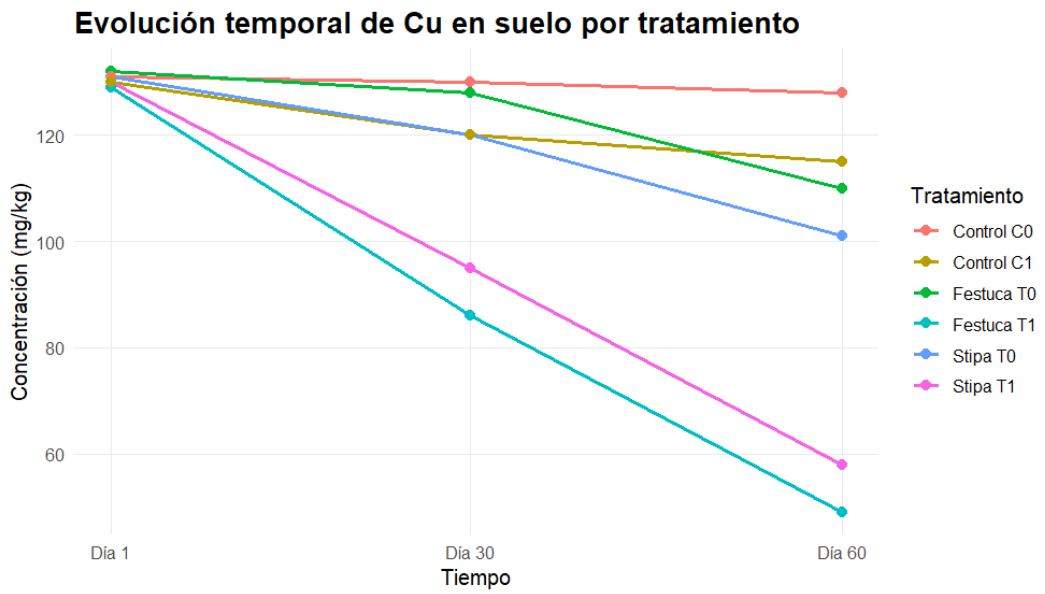
Evolución temporal de Cadmio (Cd) en suelo.



En la figura 22, En sesenta días, Festuca T1 con 10% de humus fue la formulación más eficiente para cadmio: pasó de 1.92 a 0.92 mg/kg, reducción total 1.00 mg/kg y tasa media 0.0167 mg/kg por día; el tramo Día 1 a Día 30 bajó 0.64 mg/kg y de Día 30 a Día 60 bajó 0.36 mg/kg. Stipa T1 con 10% de humus pasó de 1.95 a 0.98 mg/kg, reducción 0.97 mg/kg y tasa 0.0162 mg/kg por día; tramos de 0.63 y 0.34 mg/kg. Sin humus, Stipa T0 bajó de 1.88 a 1.55 mg/kg (0.33 mg/kg, 0.0055 mg/kg por día) y Festuca T0 de 1.89 a 1.60 mg/kg (0.29 mg/kg, 0.0048 mg/kg por día). Los controles variaron poco: C1 de 1.93 a 1.80 mg/kg (0.13 mg/kg, 0.0022 mg/kg por día) y C0 de 1.90 a 1.88 mg/kg (0.02 mg/kg, 0.00033 mg/kg por día). Conclusión: la formulación óptima es Festuca T1 con 10% de humus, porque logra la mayor reducción total y la baja reunión final (0.92 mg/kg), con descenso sostenido en ambos intervalos.

Figura 23

Evolución temporal de cobre (Cu) en suelo.



En la figura 23, En sesenta días, el cobre en el suelo disminuyó de forma sostenida cuando se combinó planta con 10% de humus. Festuca T1 pasó de 129 a 86 y luego a 49 mg/kg, con una reducción total de 80 mg/kg distribuido en 43 mg/kg entre el día uno y el día treinta y 37 mg/kg entre el día treinta y el día sesenta. Stipa T1 pasó de 130 a 95 y luego a 58 mg/kg, con reducción total de 72 mg/kg y descensos de 35 y 37 mg/kg en los mismos tramos. Sin humus, la eficiencia fue menor: Stipa T0 bajó de 131 a 120 y a 101 mg/kg para una reducción de 30 mg/kg, Festuca T0 de 132 a 128 y a 110 mg/kg para 22 mg/kg; los controles variaron poco, C1 de 130 a 120 y a 115 mg/kg para 15 mg/kg y C0 de 131 a 130 y a 128 mg/kg para 3 mg/kg. Este patrón muestra un proceso sostenido más allá del inicio y es consistente con la sinergia entre raíces y humus que mejora la estructura del sustrato, eleva la cabida de intercambio catiónico y activa

la rizosfera para inmovilizar y capturar cobre. Conclusión de formulación óptima: Festuca T1 con 10% de humus es la mejor opción para remover cobre, porque logra la mayor reducción total y la menor concentración final, 49 mg/kg, superando a Stipa T1 y a todos los tratamientos sin humus y controles.

4.1.3. Determinar la eficiencia de remoción de Pb, Cd y Cu en el suelo por efecto de cada especie y tratamiento

La eficacia de separación de los elementos pesados plomo (Pb), cadmio y cobre se evaluó en superficies tratados con los tipos Stipa ichu y Festuca dolichophylla, considerando dos tratamientos con plantas (T0 y T1) y los controles sin vegetación (C0 y C1). La eficiencia se computó como la disminución porcentual de la reunión de cada elemento desde el día 1 hasta el día 60, utilizando la fórmula:

$$\textbf{Eficiencia de remoción (\%)} = \frac{Ci - Cf}{Ci} x\ 100$$

Tabla 15

Eficiencia de remoción de Pb, Cd y Cu en el suelo por efecto de cada especie y tratamiento.

Metal	Tratamiento	Día 1 (mg/kg)	Día 60 (mg/kg)	Día 60 -Remoción (mg/kg)
Pb	Festuca T1	81.1	33.2	47.9
	Stipa T1	81.2	39.0	42.2
	Stipa T0	80.5	59.3	21.2
	Festuca T0	79.5	64.1	15.4
	Control C1	80.0	74.5	5.5
	Control C0	78.9	78.5	0.4

Cd	Festuca T1	1.92	0.92	1.00
	Stipa T1	1.95	0.98	0.97
	Stipa T0	1.88	1.55	0.33
	Festuca T0	1.89	1.60	0.29
	Control C1	1.93	1.80	0.13
	Control C0	1.90	1.88	0.02
Cu	Festuca T1	129	49	80
	Stipa T1	130	58	72
	Stipa T0	131	101	30
	Festuca T0	132	110	22
	Control C1	130	115	15
	Control C0	131	128	3

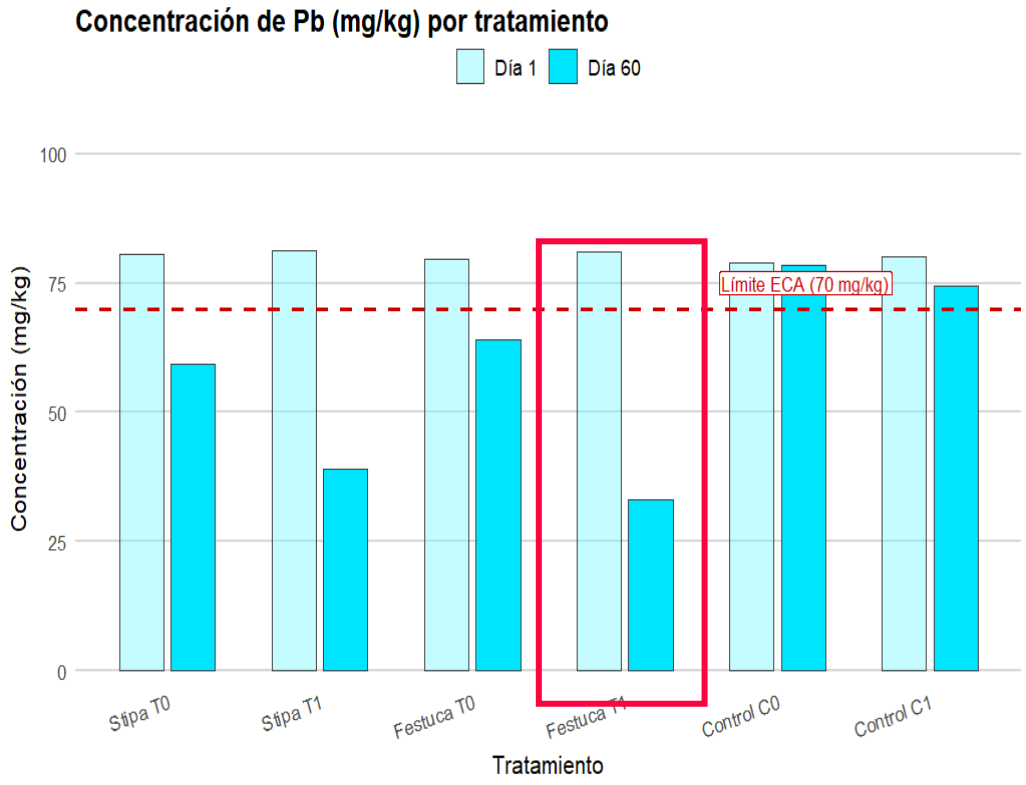
Nota. La tabla presenta valores de eficiencia de remoción (%) calculados como la baja de la reunión de elementos desde el Día 0 al Día 60.

En la tabla 15, se ve que, en los tres elementos evaluados, la combinación planta + 10% de humus (T1) produjo la depuración más alta y sostenida del suelo, con Festuca T1 como formulación líder y Stipa T1 muy cercana. En plomo, Festuca T1 pasó de 81.1 a 33.2 mg/kg y Stipa T1 de 81.2 a 39.0 mg/kg; en cadmio, Festuca T1 de 1.92 a 0.92 mg/kg y Stipa T1 de 1.95 a 0.98 mg/kg; en cobre, Festuca T1 de 129 a 49 mg/kg y Stipa T1 de 130 a 58 mg/kg, superando con holgura a T0 y a los controles. Este patrón coherente indica que el humus mejoró la estructura y la retención del sustrato, elevó la cabida de intercambio catiónico y activó la rizosfera, permitiendo inmovilización y captura vegetal más eficaces a lo largo del tiempo. Conclusión: la formulación óptima para un escenario de remoción multicontaminante es Festuca T1 con 10% de humus, por alcanzar las menores concentraciones finales en Pb, Cd y Cu y la mayor magnitud de remoción frente a las alternativas comparadas.

a) Comparación de los resultados de concentración en el día 60 con la normativa:

Figura 24

Remoción de la reunión de Pb en superficies tratados por tratamiento.

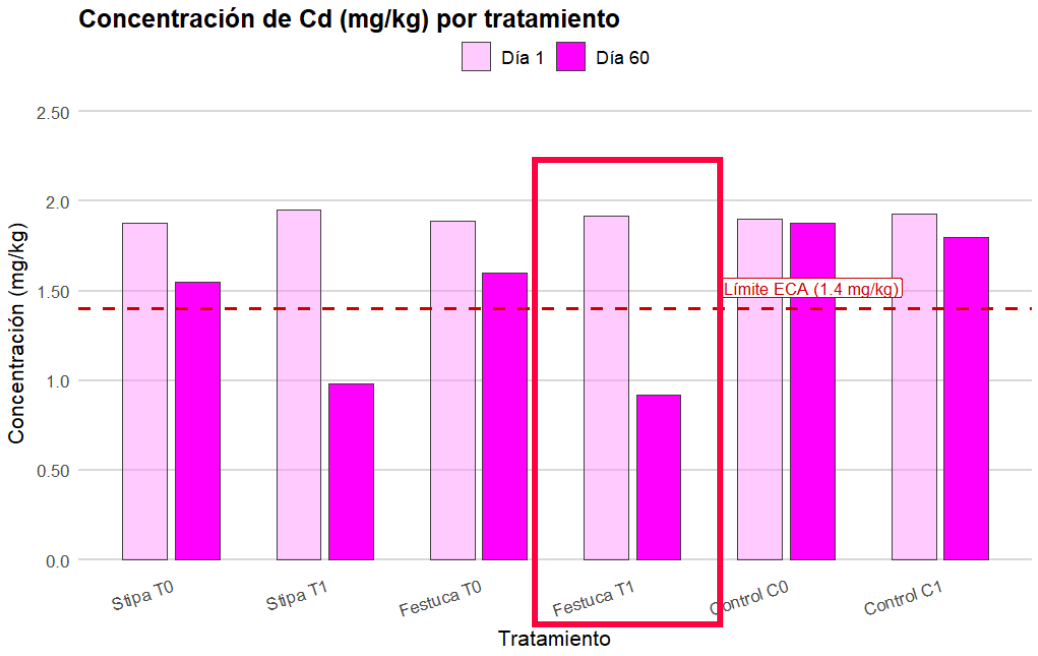


En la figura 24, Se muestra que el plomo (límite ECA = 70 mg/kg), los mejores resultados en el día 60 son los tratamientos intensificados T1: **Festuca T1** = 33.2 mg/kg y Stipa T1 = 39.0 mg/kg. Ambos están ampliamente por debajo del límite y muestran las concentraciones más bajas de todo el conjunto. Los tratamientos base T0 también cumplen, aunque con menos holgura: Stipa T0 = 59.3 mg/kg y Festuca T0 = 64.1 mg/kg (todavía por debajo de 70 mg/kg, pero más cerca del umbral). En contraste, los controles no cumplen: C0 = 78.5 mg/kg y C1 = 74.5 mg/kg superan el límite.

La formulación más óptima es Festuca T1. Es la que deja la concentración final más baja y el mayor margen bajo la norma: 33.2 mg/kg a día 60.

Figura 25

Remoción de la reunión de Cadmio (Cd) en superficies tratados por tratamiento.



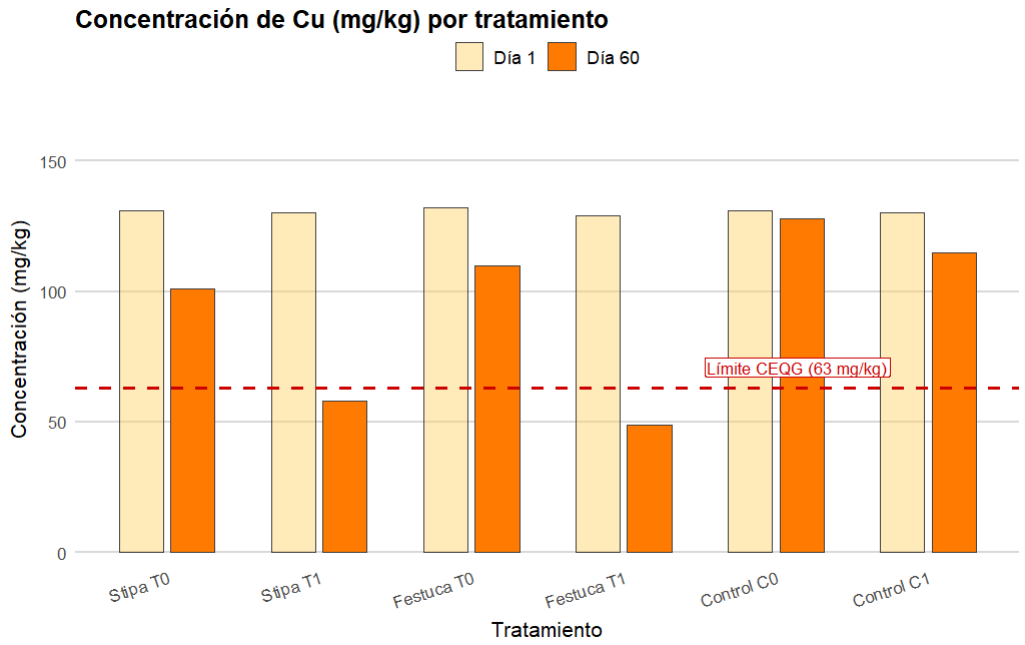
En la figura 25, se observa los resultados del día 60, solo los tratamientos intensificados (T1) cumplen la normativa: Festuca T1 = 0.92 mg/kg (margen 0.48 mg/kg por debajo del límite) y Stipa T1 = 0.98 mg/kg (margen 0.42 mg/kg). Los tratamientos base no alcanzan conformidad: Stipa T0 = 1.55 mg/kg (excede 0.15 mg/kg) y Festuca T0 = 1.60 mg/kg (excede 0.20 mg/kg). Los controles se mantienen claramente por encima: C0 = 1.88 mg/kg (excede 0.48 mg/kg) y C1 = 1.80 mg/kg (excede 0.40 mg/kg). El orden de desempeño por concentración residual es, de mejor

a peor: Festuca T1 < Stipa T1 < Stipa T0 < Festuca T0 < Control C1 < Control C0.

Por otro lado, la opción óptima es Festuca T1 (menor concentración final y mayor margen), con Stipa T1 como alternativa válida.

Figura 26

Distribución de la eficacia de destitución (%) de cobre (Cu) en superficies tratados por tratamiento.



En la figura 26, solo los tratamientos intensificados alcanzan conformidad: Festuca T1 = 49 mg/kg (margen 14 mg/kg por debajo del límite) y Stipa T1 = 58 mg/kg (margen 5 mg/kg). Los tratamientos base quedan por encima: Stipa T0 = 101 mg/kg (excede 38 mg/kg) y Festuca T0 = 110 mg/kg (excede 47 mg/kg). Los controles permanecen altos: C0 = 128 mg/kg (excede 65 mg/kg) y C1 = 115 mg/kg (excede 52 mg/kg). El

orden de desempeño por concentración residual es: Festuca T1 < Stipa T1 < Stipa T0 < Festuca T0 < Control C1 < Control C0.

b) Evolución del porcentaje de remoción de los metales pesados según los días 30 y 60.

Se evaluó la variación del porcentaje de separación de elementos pesados (Pb, Cd y Cu) en superficies tratados con Stipa ichu y Festuca dolichophylla, con y sin adición de humus de lombriz (10%), a los 30 y 60 días de exposición. Esta evaluación permitió analizar la eficacia temporal del proceso de fitorremediación, identificando los tipos y tratamientos que presentaron mayor capacidad de reducción de metales durante el periodo experimental.

Tabla 16

Resultados del porcentaje de remoción para el día 30 y 60 de (Pb, Cd y Cu) de muestras de suelo de los tratamientos del diseño experimental de fitorremediación con especies de Stipa ichu y Festuca dolichophylla.

Metal	Tratamiento	% Remoción de concentraciones	
		Día 30	Día 60
Pb (mg/kg)	Stipa T0	10.19%	26.34%
	Stipa T1	25.62%	51.97%
	Festuca T0	4.65%	19.37%
	Festuca T1	29.72%	59.06%
	Control C0	0.75%	1.26%
	Control C1	3.13%	6.88%
Cd (mg/kg)	Stipa T0	8.51%	17.55%
	Stipa T1	32.31%	49.74%
	Festuca T0	7.94%	15.34%
	Festuca T1	33.33%	52.08%

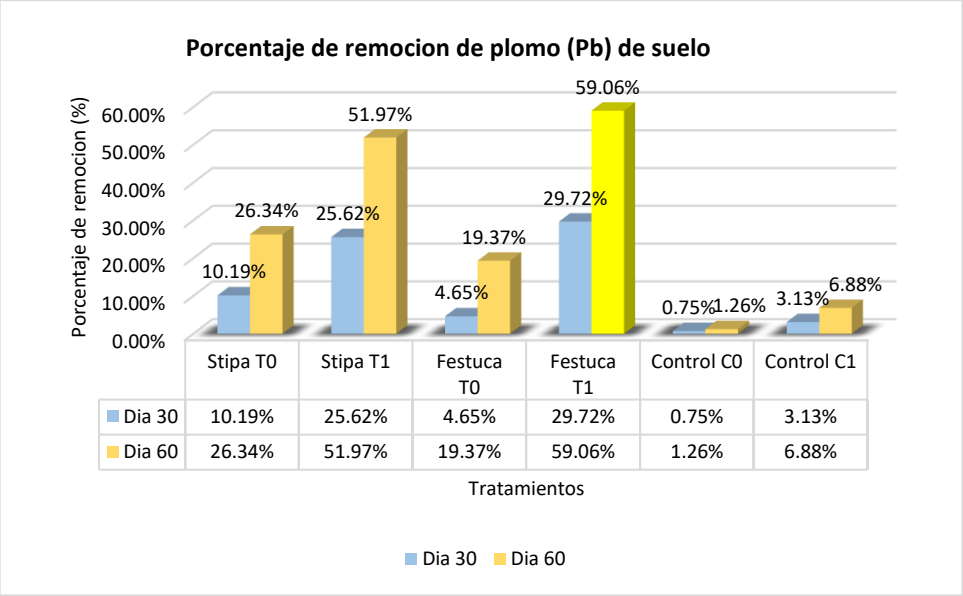
	Control C0	0.53%	1.05%
	Control C1	1.55%	6.74%
Cu	Stipa T0	8.40%	22.90%
(mg/kg)	Stipa T1	26.92%	55.38%
	Festuca T0	3.03%	16.67%
	Festuca T1	33.33%	62.02%
	Control C0	0.76%	2.29%
	Control C1	7.69%	11.54%

Nota. La tabla muestra hallazgos del cálculo de porcentaje de remoción de residuos sólidos que es la cuantificación de los ensayos de fitorremediación.

En la tabla 16, se evidencio que la eficacia de separación de metales pesados aumentó progresivamente entre los 30 y 60 días de exposición en todos los tratamientos. La especie Festuca dolichophylla con humus (T1) presentó los mayores porcentajes de remoción, alcanzando 52.08 % para Cu, 49.74 % para Cd y 51.97 % para Pb, mientras que Stipa ichu con humus mostró eficiencias ligeramente menores, pero también significativas. En contraste, los tratamientos sin humus y los controles (C_0 y C_1) registraron porcentajes mínimos, confirmando que la adición de humus de lombriz potenció la capacidad fitorremediadora de ambas especies al optimizar la biodisponibilidad y impregnación de los elementos. En general, el Cu fue el metal más removido, seguido del Pb y el Cd, reflejando la afinidad diferencial de las especies frente a cada elemento.

Figura 27

Distribución de la eficiencia de remoción (%) de Plomo (Pb) en suelos tratados.



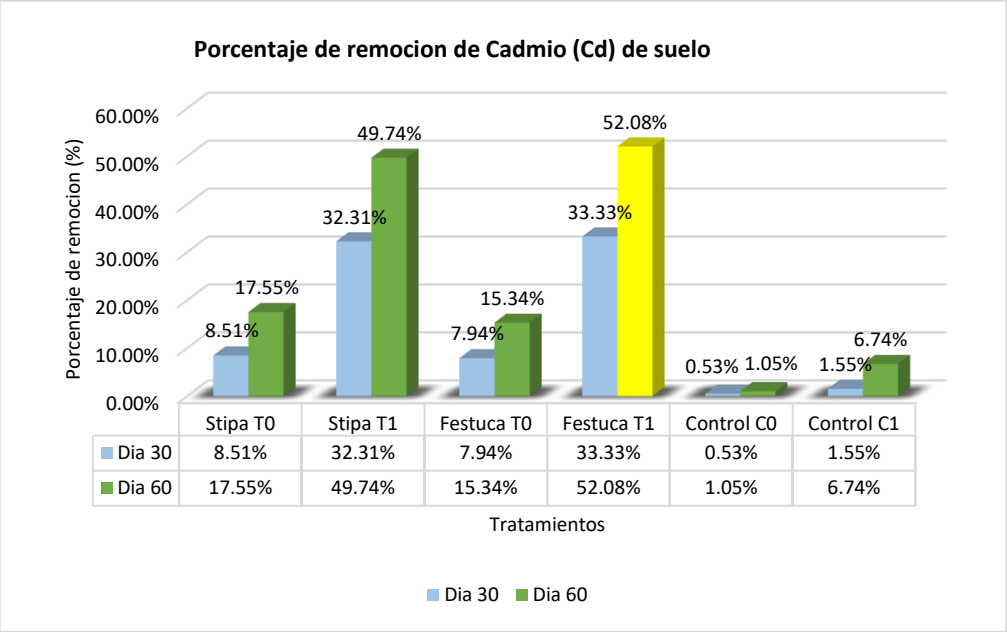
En la figura 27, se observa que, a 60 días, la mayor remoción fue Festuca T1 = 59.06 %, seguida de Stipa T1 = 51.97 %. En T0, Stipa = 26.34 % superó a Festuca = 19.37 %. El efecto del manejo a 60 días fue amplio: Festuca aumentó 39,69 puntos porcentuales (de 19.37 a 59.06) y Stipa 25.63 puntos porcentuales (de 26.34 a 51.97). El efecto del tiempo de 30 a 60 días en T1 fue de 29.34 puntos porcentuales para Festuca y 26.35 puntos porcentuales para Stipa. Los controles a 60 días se mantuvieron bajos (C0 = 1.26 %, C1 = 6.88 %); respecto del mejor control, Festuca T1 fue 8.59 veces y Stipa T1 7.56 veces superior.

Donde la extracción de Pb es sensible tanto al manejo como al tiempo de exposición. Festuca T1 conserva una ventaja operativa de 7.09 frente a Stipa T1, por lo que se configura como la opción preferente en

ventanas de 60 días cuando el objetivo es maximizar remoción sin introducir inmovilizantes.

Figura 28

Distribución de la eficiencia de remoción (%) de Cadmio (Cd) en suelos tratados.

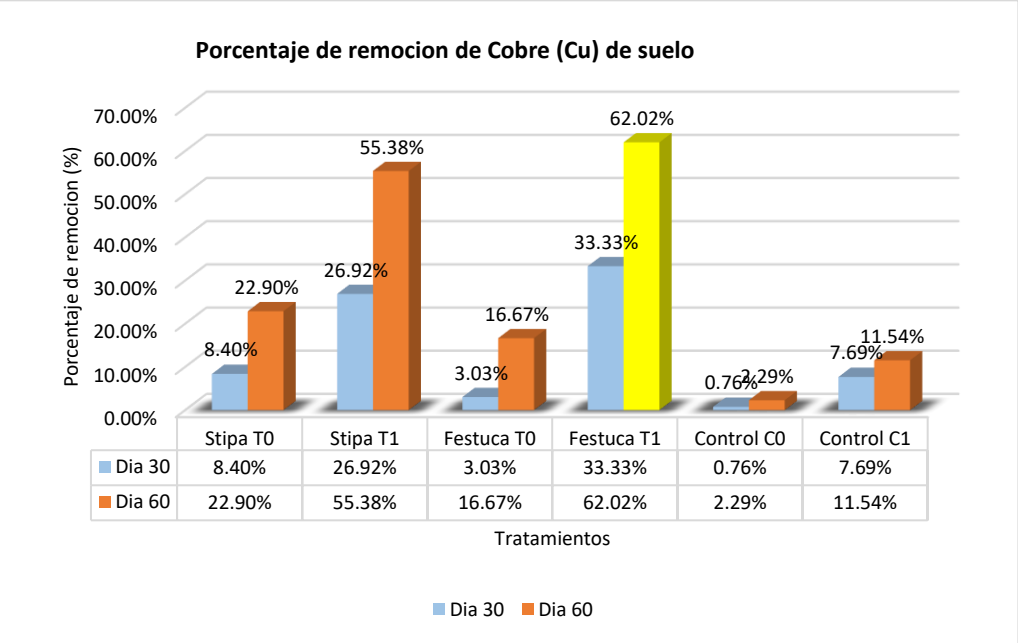


En la figura 28, se encuentran los hallazgos calculados del porcentaje de remoción de cadmio en superficie tratada, que a 60 días, Festuca T1 = 52.08 % y Stipa T1 = 49.74 % mostraron eficiencias altas y cercanas. En T0, Stipa = 17.55 % fue ligeramente superior a Festuca = 15.34 %. El efecto del manejo a 60 días fue de 36.74 puntos porcentuales (Festuca) y 32.19 puntos porcentuales (Stipa), mientras que el efecto temporal (30→60) en T1 fue de 18.75 y 17.43 puntos porcentuales, respectivamente. Controles a 60 días: C0 = 1.05 %, C1 = 6.74 %; frente al mejor control, Festuca T1 y Stipa T1 alcanzaron 7.73 y 7.38 veces. Donde la fitoextracción de Cd responde de forma robusta al manejo

intensivo. Festuca T1 es ligeramente superior a Stipa T1 (diferencia 2.34 pp), por lo que ambas resultan viables en entornos con restricciones de disponibilidad de planta o de logística, manteniendo eficiencias de orden medio–alto en 60 días.

Figura 29

Distribución de la eficiencia de remoción (%) de Cu en suelos tratados.



En la figura 29, se ven los hallazgos de 60 días, Festuca T1 = 62.02 % lideró el conjunto, seguida de Stipa T1 = 55.38 %. En T0, Stipa = 22.90 % superó a Festuca = 16.67 %, evidenciando que el manejo intensivo reconfigura la jerarquía entre especies. El efecto del manejo a 60 días fue particularmente elevado: Festuca +45.35 pp; Stipa +32.48 pp. La ganancia temporal (30→60) dentro de T1 fue amplia y comparable (Festuca +28.69 pp; Stipa +28.46 pp). Los controles se mantuvieron en rangos bajos (C0 = 2.29 %; C1 = 11.54 %); frente al mejor control, Festuca T1 y Stipa T1 fueron 5.38 y 4.80 veces superiores.

Por otro lado, el cobre (Cu) exhibe la mayor mejora absoluta bajo manejo intensivo. Festuca T1 es la estrategia óptima, con Stipa T1 como alternativa robusta (diferencia 6.64 pp) cuando se prioriza la extracción rápida en ciclos de 60 días.

4.2. Discusiones

Los parámetros edáficos de línea base indican un pH colindante a la neutralidad y conductividades bajas–moderadas, situaciones que ayudan la fijación de gramíneas altoandinas y bajan la fitotoxicidad inmediata, por lo que Stipa ichu y Festuca dolichophylla son especies plausibles para operar con mecanismos mixtos de fitoestabilización/fitoextracción. Esta caracterización de línea base se integró explícitamente en el diseño del estudio y en el encuadre del problema y objetivos, asegurando la pertinencia ecológica de las especies seleccionadas y la comparabilidad con estándares nacionales (ECA-Suelo) usados como referencia de interpretación. Donde los suelos alrededor del botadero presentan pH 6.5-7.2 (promedio 6.8) y CE 230 - 680 µS/cm (promedio de 523 µS/cm), con el testigo en pH 6.8; CE 230 µS/cm. En metales iniciales: Pb 90 - 41 mg/kg (testigo 25), Cd 2.2-1.4 mg/kg (testigo 0.8) y Cu 153–33 mg/kg (testigo 27); se supera ECA en Pb (P1=90>70), Cd (P1–P2=2.2–1.7>1.4) y Cu (P1=153>63). Este gradiente decreciente con la distancia confirma fuente puntual (botadero) y replica el patrón histórico reportado para Cancharani por Torres (2018) (picos Pb 90, Cd 2.2, Cu 153 mg/kg y descenso radial), y es coherente con impactos similares observados en Ilave por Pacompia (2023) (lixiviados con Pb, As, Cd detectables y suelos con acumulación sostenida). En paralelo, la presencia de gramíneas tolerantes en escenarios mineros

altoandinos Stipa ichu entre ellas es consistente con Martínez, Sarmiento y Delgado (2021), que describe tolerancia y fitoestabilización en matrices con metales multielemento. En suma, tu línea base confirma idoneidad edáfica (pH neutro; salinidad baja - moderada) para evaluar Stipa y Festuca como fitorremediadoras.

La presente investigación permitió identificar la formulación óptima de fitorremediación para superficies contaminadas con Pb, Cd y Cu en el botadero de Cancharani, determinándose que la combinación de Festuca dolichophylla + 10 % de humus (T1) constituye la alternativa más eficiente bajo condiciones controladas. Esta formulación alcanzó eficiencias de remoción de 59.06 % para Pb, 52.08 % para Cd y 62.02 % para Cu, superando tanto a Stipa ichu con humus (51.97 %, 49.74 % y 55.38 %) como a los tratamientos sin enmienda, donde las eficiencias no superaron el 26 %. La respuesta superior de Festuca dolichophylla se atribuye a su mayor densidad radicular, mayor biomasa y mayor interacción con la materia orgánica, factores que incrementan la biodisponibilidad y la retención de metales en la rizósfera, como también lo señalaron Steliga y Dorota (2020) al analizar el desempeño de especies del género Festuca. Por su parte, Stipa ichu mostró una respuesta positiva al humus, destacándose por su capacidad de fitoestabilización, lo que sugiere que su uso sería más adecuado en suelos de alta pendiente o con riesgo de erosión, complementando la acción extractiva de Festuca. En concordancia con Abderrafa et al. (2025), el humus actuó como un agente bioactivo que mejoró la cabida de intercambio catiónico y la retención metálica, lo cual explica el aumento de entre 30 y 45 puntos porcentuales en la eficiencia de remoción respecto a los tratamientos sin enmienda. Así, la formulación óptima identificada en este estudio no solo

confirma la importancia del uso de materia orgánica en los procesos de fitorremediación, sino que demuestra que la asociación de Festuca dolichophylla con humus natural representa una estrategia sostenible, eficaz y adaptable a las condiciones edáficas altoandinas, siendo la más recomendable para la restauración de superficies impactados por diligencias mineras en la región de Puno.

El crecimiento vegetal también reflejó la influencia positiva de la enmienda orgánica. En los tratamientos con humus, Festuca dolichophylla alcanzó una altura promedio de 27.5 cm y Stipa ichu de 25.2 cm, frente a los valores de 18.9 cm y 17.6 cm obtenidos en T0. Este incremento en biomasa y vigor sugiere una mejora fisiológica atribuida a la disponibilidad de nutrientes orgánicos, relacionado con lo reportado por Martínez et al. (2021), marcaron que ambas especies muestran alta tolerancia en suelos mineros, aunque sin cuantificar la influencia de las enmiendas. En contraste, la presente investigación aporta evidencia empírica que demuestra cómo la adición de humus no solo mejora la tolerancia, sino que potencia la absorción metálica, consolidando el rol de estas gramíneas como especies fitorremediadoras adaptadas a las situaciones del altiplano. En El actual examen permitió identificar la formulación óptima de fitorremediación para superficies contaminadas con Pb, Cd y Cu en el botadero de Cancharani, determinándose que la combinación de Festuca dolichophylla + 10 % de humus (T1) constituye la alternativa más eficiente bajo condiciones controladas. Esta formulación alcanzó eficiencias de remoción de 59.06 % para Pb, 52.08 % para Cd y 62.02 % para Cu, superando tanto a Stipa ichu con humus (51.97 %, 49.74 % y 55.38 %) como a los tratamientos sin enmienda, donde las eficiencias no superaron el 26 %. La respuesta superior de Festuca dolichophylla

se atribuye a su mayor densidad radicular, mayor biomasa y mayor interacción con la materia orgánica, factores que incrementan la biodisponibilidad y la retención de metales en la rizósfera, como también lo señalaron Steliga y Dorota (2020), al analizar el desempeño de especies del género Festuca. Por su parte, Stipa ichu mostró una respuesta positiva al humus, destacándose por su capacidad de fitoestabilización, lo que sugiere que su uso sería más adecuado en suelos de alta pendiente o con riesgo de erosión, complementando la acción extractiva de Festuca. En concordancia con Abderrafa et al. (2025), el humus actuó como un agente bioactivo que mejoró la cabida de intercambio catiónico y la retención metálica, lo cual explica el aumento de entre 30 y 45 puntos porcentuales en la eficiencia de remoción respecto a los tratamientos sin enmienda. Así, la formulación óptima identificada en este estudio no solo confirma la importancia del uso de materia orgánica en los procesos de fitorremediación, sino que demuestra que la asociación de Festuca dolichophylla con humus natural representa una estrategia sostenible, eficaz y adaptable a las condiciones edáficas altoandinas, siendo la más recomendable para la restauración de superficies impactados por diligencias mineras en la región de Puno. cuanto a la remoción de plomo (Pb), los resultados obtenidos muestran una baja de 81.1 mg/kg a 33.2 mg/kg en Festuca dolichophylla T1 (59.06 %) y de 81.2 mg/kg a 39.0 mg/kg en Stipa ichu T1 (51.97 %). Ambas especies lograron concentraciones finales menores del límite del ECA peruano (70 mg/kg), a diferencia de los tratamientos sin humus, que no alcanzaron dicho umbral. Estos hallazgos son mayores a los fijados por Venegas (2016), quien obtuvo un 36.5 % de separación de Pb con Stipa ichu en superficies de La Oroya sin enmiendas orgánicas. La comparación evidencia que la materia orgánica actúa como agente

clave al incrementar la biodisponibilidad del plomo y la capacidad de absorción vegetal, optimizando el proceso en suelos pobres en carbono.

Respecto al cadmio (Cd), las reuniones iniciales de 1.92 mg/kg disminuyeron a 0.92 mg/kg en Festuca T1 (52.08 %) y 0.98 mg/kg en Stipa T1 (49.74 %), situándose ambas por debajo del valor ECA (1 mg/kg). En los tratamientos sin humus, la reducción fue inferior al 20 %. Este comportamiento concierta con Silva et al. (2024), quienes demostraron que el incremento de materia orgánica mejora la movilidad del cadmio en la rizósfera, facilitando su absorción sin comprometer la salud vegetal. Así, la presente investigación confirma que la eficiencia de remoción no depende exclusivamente del nivel inicial de contaminación, sino de la interacción bioquímica entre el sustrato y la planta, modulada por la calidad de la enmienda orgánica. En el caso del Cu, las reuniones disminuyeron de 129 mg/kg a 49 mg/kg en Festuca T1 y de 130 mg/kg a 58 mg/kg en Stipa T1, con eficiencias de 62.02 % y 55.38 %, respectivamente. En ausencia de humus, las remociones fueron notablemente menores, con apenas 16.67 % en Festuca y 22.90 % en Stipa. Estos resultados confirman la afinidad del Cu por la elemento orgánico, y concuerdan con los estudios de Guzmán et al. (2022), quienes identificaron a Stipa ichu como hiperacumuladora de Cu, Fe y Zn. Sin embargo, en esta investigación se evidencia que Festuca dolichophylla supera la capacidad de Stipa cuando se mejora la estructura edáfica con humus, reforzando la idea de que la sinergia entre raíces densas y compuestos húmicos incrementa la retención y absorción del metal.

Los hallazgos también son confrontables con los derivados por Arce, Calderón y Jarecca (2021), quienes observaron que Festuca dolichophylla

alcanzó eficiencias de remoción del 82 % para mercurio frente al 73 % de Stipa ichu en suelos de Ananea. En la presente investigación se mantiene la misma tendencia, con Festuca dolichophylla mostrando valores superiores para los tres metales evaluados. Este patrón reafirma que la especie posee un sistema radicular más desarrollado y una mayor capacidad de fitoextracción y fitoestabilización, especialmente en presencia de materia orgánica. Asimismo, los valores iniciales de Pb (81 mg/kg), Cd (1.9 mg/kg) y Cu (130 mg/kg) coinciden con los reportados por Torres (2018) para el mismo botadero (90 mg/kg, 2.2 mg/kg y 153 mg/kg, respectivamente), validando la similitud del contexto de contaminación y la pertinencia del área de estudio. Al término de 60 días, los tratamientos con Festuca dolichophylla + humus redujeron los metales a 33.2 mg/kg (Pb), 0.92 mg/kg (Cd) y 49 mg/kg (Cu), situándose por debajo de los límites ECA, lo que confirma una descontaminación efectiva del suelo.

En síntesis, la eficiencia promedio de remoción con humus alcanzó 57.72 % para Festuca dolichophylla y 52.36 % para Stipa ichu, frente a 18.59 % y 22.26 % en los tratamientos sin humus. Estos resultados corroboran que la afiliación de elemento orgánico aumenta la cabida fitorremediadora en más del doble respecto al suelo sin enmienda. En conjunto con los antecedentes de Abderrafa et al. (2025) y Steliga y Dorota (2020), se confirma que el humus mejora tanto la bioacumulación como la fitoestabilización, generando un enfoque sostenible para la redención de superficies corrompidos con elementos pesados.

CONCLUSIONES

A partir del análisis integral de la línea base (pH, CE y concentraciones iniciales), de las pruebas controladas con Stipa ichu y Festuca dolichophylla (con/sin humus) y de la evaluación de eficiencias de remoción a 60 días para Pb, Cd y Cu, se establecen las siguientes conclusiones:

- **Primero:** El área de estudio evidencia contaminación multimetálica con gradiente decreciente desde la fuente: valores iniciales de referencia Pb 90–41 mg/kg, Cd 2.2–1.4 mg/kg y Cu 153–33 mg/kg (testigo: Pb 25; Cd 0.8; Cu 27 mg/kg), en un pH neutro (6.5–7.2) y CE baja–moderada (230–680 µS/cm). Este escenario edáfico es compatible con la implantación de gramíneas altoandinas y justifica evaluar fitorremediación con Stipa y Festuca.
- **Segundo:** La implementación experimental permitió establecer que la concentración óptima de humus es del 10 %, ya que este porcentaje mejoró significativamente las situaciones físico-químicas del suelo y el desarrollo de ambas especies. El humus actuó como un agente bioactivador, incrementando la cabida de permuta catiónico, la actividad microbiana y la biodisponibilidad de Pb, Cd y Cu, lo cual se reflejó en un desarrollo vegetal más fornido y en mayores tasas de impregnación. Festuca dolichophylla presentó un mejor desempeño fisiológico, alcanzando una altura promedio de 27.5 cm frente a 25.2 cm de Stipa ichu, lo que evidencia su mayor adaptabilidad y eficiencia en ambientes altoandinos. Donde la afiliación de elemento orgánico

ayuda la rizodegradación y la estabilización de elementos pesados en superficie.

- **Tercero:** La eficiencia de remoción de Pb, Cd y Cu según especie y tratamiento, donde los resultados evidenciaron que la formulación óptima de fitorremediación corresponde a Festuca dolichophylla + 10 % de humus (T1), la cual alcanzó eficiencias de 59.06 % para Pb, 52.08 % para Cd y 62.02 % para Cu, logrando reducir las concentraciones finales a 33.2 mg/kg (Pb), 0.92 mg/kg (Cd) y 49 mg/kg (Cu). En contraste, Stipa ichu con 10 % de humus alcanzó eficiencias ligeramente menores: 51.97 % (Pb), 49.74 % (Cd) y 55.38 % (Cu). Sin embargo, Stipa ichu demostró un rol complementario relevante, destacando en fitoestabilización y control superficial del suelo, por lo que su uso conjunto con Festuca dolichophylla podría potenciar los efectos de remediación integral.
- **Cuarto:** Como conclusión general, la investigación demuestra que la fitorremediación asistida con humus al 10 % constituye una alternativa sostenible, económica y altamente eficiente para la recuperación de superficies corrompidos con Pb, Cd y Cu en la región altiplánica de Puno. Festuca dolichophylla se consolida como la especie más eficaz para la fitoextracción activa de metales pesados, mientras que Stipa ichu cumple un papel clave en la fitoestabilización y recuperación superficial del suelo. La sinergia entre ambas especies y el humus orgánico optimiza el proceso de descontaminación, logrando concentraciones finales por debajo de los ECA del Perú.

RECOMENDACIONES

En función de los resultados obtenidos y las problemáticas identificadas durante el estudio, se proponen acciones priorizadas para optimizar la fitorremediación, facilitar su escalamiento en campo y asegurar monitoreo, gestión de biomasa y sostenibilidad operativa.

- **Primero:** A los próximos científicos se les encomienda usar la formulación óptima de fitorremediación con Festuca dolichophylla y 10 % de humus de lombriz en parcelas experimentales de mayor extensión dentro del botadero de Cancharani y en otros suelos con condiciones edáficas y climáticas similares. Esta ampliación permitirá validar la eficiencia del método bajo condiciones naturales, considerando variables como el drenaje, la radiación solar y la variabilidad de textura del suelo, garantizando así su replicabilidad y viabilidad como tecnología ambiental sostenible.
- **Segundo:** Se recomienda para futuros trabajos evaluar el uso combinado de Festuca dolichophylla y Stipa ichu, aprovechando sus diferentes mecanismos de acción: la primera con mayor capacidad de fitoextracción y la segunda con mayor eficiencia en fitoestabilización. Esta sinergia permitiría remover metales pesados y, al mismo tiempo, mejorar la cobertura vegetal, reducir la erosión y estabilizar los horizontes superficiales del suelo, contribuyendo a la restauración ecológica integral del área degradada.
- **Tercero:** A los próximos científicos se les confía efectuar programas de monitoreo a largo plazo (de 6 a 12 meses), a fin de evaluar la

persistencia de la remoción metálica y la estabilidad química del suelo tratado. Además, se sugiere incluir el seguimiento de medidas complementarios como pH, CE, elemento orgánica y remobilización de elementos durante la temporada de lluvias, garantizando una evaluación integral y ambientalmente segura de la eficacia de la fitorremediación.

- **Cuarto:** Para investigaciones posteriores, se recomienda ampliar el estudio con diferentes concentraciones de humus (5 %, 15 % y 20 %) y compararlas con otras enmiendas naturales como compost, biochar o vermicompost. Este enfoque permitirá identificar la concentración óptima en términos de eficiencia y costo ambiental, optimizando el proceso de fitorremediación y promoviendo el uso de recursos orgánicos locales como parte de una gestión sostenible del suelo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abdel Shafy, H. I., & Mansour, M. S. (2024). Landfill leachate: Sources, nature, organic composition and treatment—An environmental overview. *Journal of Environmental Chemical Engineering, 12*(9).

Abderrafaa Tamma, A., Lejcuś, K., Fiałkiewicz, W., & Marczak, D. (2025). Avances en fitorremediación: una revisión de las enmiendas del suelo para el manejo de la polucion por elementos pesados. *Sustainability, 17*(13), 5688. doi:https://doi.org/10.3390/su17135688

Acharya, A., Nacer , B., Pilipovic, A., Perez, E., Maddox-Mandolini , M., & De La Fuente, H. (2025). Current assessment and future perspectives on phytoremediation of heavy metals: Plants, mechanisms and field studie. *Plants, 14*(18), 2847. doi:https://doi.org/10.3390/plants14182847

Adiloğlu, S. (2018). *Eliminación de metales pesados mediante fitorremediación.*

Arce Sancho, S. (2023). *Eficiencia de fitorremediación del Stipa ichu y la Festuca dolichophylla usando tiosulfato de amonio y ioduro de K de superficie corrompidos con mercurio por las diligencias mineras del distrito de Ananea Puno – Perú.* Universidad Nacional Mayor de San Marcos. doi:https://hdl.handle.net/20.500.12672/19829

Arce Sancho, S., Calderón Celis, J. M., & Jarecca Cusacani, Y. (2021). *Optimización del proceso de fitorremediación con Festuca dolichophylla y tiosulfato de amonio para mejorar la eficiencia de la absorción de mercurio en superficies corrompidas por la minería en el distrito de Ananea Puno, Perú.* Lima: Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

Avila González, D. A. (2017). *itoextracción de superficies corrompidas por elementos potencialmente tóxicos en la región de Atlixco, Puebla.* Benemérita Universidad Autónoma.

Balali Mood, M., Naseri, K., Tahergorabi, Z., Khazdair, M. R., & Sadeghi, M. (2021). oxic Mechanisms of Five Heavy Metals: Mercury, Lead, Chromium, Cadmium, and Arsenic. Retrieved from https://www.frontiersin.org/journals/pharmacology/articles/10.3389/fphar.2021.643972/ful

Banco Mundial. (2022). *What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050.* Obtenido de https://www.worldbank.org/en/news/infographic/2018/09/20/what-a-waste-2

Basta, N. e. (2005). Lixiviación de elementos pesados (Cu, Ni y Zn) y materia orgánica tras el uso de lodos de depuradora en superficies de diferente textura. *Journal of Environmental Quality.*

Beltrán Villavicencio, M. (2001). *Fitoextracción en suelos contaminados con Cadmio y Zinc empleando tipos de vegetales comestibles.*

Cadillo, R. M. (2020). *Evaluación de la cabida fitorremediadora de especies nativas en superficies corrompidas con elementos pesados en la región Puno.*UNA, Puno.

Canales Farah, J. D. (2021). Revisión esquematica de varios procesos de fitorremediación de superficies corrompidas por elementos pesados. *Universidad César Vallejo*. Obtenido de https://hdl.handle.net/20.500.12692/61315

Castro Bedriñana, J., Chirinos Peinado, D., & Peñaloza Fernández, R. (2020). Bioacumulación de Pb en las raíces y la parte aérea de pastos naturales y cultivados en zonas altamente contaminadas. *Avances en Ciencia, Tecnología e Ingeniería de Sistemas, 5*(2), 126-132. doi:https://dx.doi.org/10.25046/aj050216

Delgadillo López, A. E., & et al. (2011). Fitorremediación: una alternativa para eliminar la contaminación. *Revista Ciencia, 55*(3).

Diaz Hoyos, L. M., & Peralta Rodriguez, L. R. (2017). *Evaluación comparativa de la cabida de junta de plomo (Pb) y cadmio (Cd) en Scirpus californicus (Totora) y Stipa ichu (Ichu) bajo condiciones hidropónicas.* Arequipa: UCSM. Obtenido de file:///C:/Users/HP/Downloads/42.0152.IB%20(1).pdf

FAO. (2018). *La poluciob de superficie: una realidad oculta. ONUs para la Alimentación y la Agricultura.* Obtenido de https://openknowledge.fao.org

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2021). *Contaminacion.* Soil pollution.

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2021). *Uso de enmiendas orgánicas en el suelo.*

García, J., & Ramírez, L. (2019). *Fitorremediación: fundamentos y aplicaciones en la recuperación de superficies poluantes.* Revista de Ciencias Ambientales.

Gautam, S., Ram Paudel , M., & Devkota, A. (2025). Heavy metal pollution and phytoremediation – a review. *Nepal Journal of Science and Technology*, 33-50. Retrieved from

https://www.nepjol.info/index.php/njob/article/download/78185/59903/226126

Gómez Navarro, T., & Galdames, A. (2017). Fitorremediación: alternativa biotecnológica para recuperar superficies poluantes. *Revista de Ingeniería Ambiental, 21*(2), 12-25.

Guzmán, M., Arribasplata, M. R., Obispo, M., & Tailandeses, S. (2022). Fitorremediación de metales pesados en pasivos mineros mediante Stipa ichu y Cortaderia nitida: una evaluación de laboratorio. *Conferencia y Exposición Anual de la SME 2022*, 221-223. doi:https://www.scopus.com/pages/publications/85129713303

Hall, J. L. (2002). *Mecanismos celulares para la desintoxicación y tolerancia a elementos pesados.*

Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2021). *Metodología de la investigación (7.ª ed.).*

Hernandez, M. (2022). Fitorremediación de superficies poluantes por elementos pesados: una revisión. *CAMJOL*. Obtenido de https://camjol.info/index.php/elhigo/article/view/15197

Huaman Santa Cruz , A., & Fernandez Fernandez , L. (2020). *Examen de la adaptabilidad de las tipos de Stipa ichu y chrysopogon zizanioides en los remanenres mineros de San José de Parac - San Mateo, Lima.* Lima: UPeU Obtenido de file:///C:/Users/HP/Downloads/Aaron_Trabajo_Bachiller_2020.pdf

Impellitteri, C. e. (2020). El tipo de humus forestal determina la junta de elementos pesados en ambientes forestales específicos. *Environmental Science and Pollution Research*.

Intagri. (2020). La conductividad eléctrica de superficie en el progreso de los cultivos.

Kabata Pendias, A. (2011). *Oligoelementos en suelos y plantas (4ª ed.).* CRC Press.

Kjeldsen , P., Barlaz, M. A., Rooker, A. P., Baun, A., Ledin, A., & Christensen, T. H. (2002). Present and long-term composition of MSW landfill leachate: A critical review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 32*(4-5), 297 - 336.

Lasat, M. M. (2002). *Fitoextracción de metales tóxicos: una revisión de los mecanismos biológicos.*

Li, Q. e. (2022). Speciation of heavy metals in soils and their immobilization by minerals, organic compounds and microbes. *819*, 153198.

Liu, W. e. (2020). Disponibilidad y junta de elementos pesados en superficies de producción de hortalizas en invernadero. *Focus on the influencing*.

López, D., Torres, M., & Vega, C. (2021). *Efecto del humus de lombriz sobre la disponibilidad de elementos pesados y el incremento vegetal en superficies poluantes.*

Luo, J.-S. e. (2021). Mecanismos de fitorremediación y desintoxicación de cadmio en plantas. *The Crop Journal, 9*(3), 476 - 488.

Martínez Manchego, L., Sarmiento Sarmiento, G., & Bocardo Delgado, E. (2021). Tipos de vegetales nativas con potencial para la fitorremediación de

superficies alto andinos poluantes por remanentes de diligencia minera. *33*(3), 161-170. doi:http://www.doi.org/10.51372/bioagro333.2

MINAM. (2017). *Ley N° 1278. Ley de Gestión Integral de remanentes Sólidos. .* Lima - Perú.

MINAM. (2022). *Diagnóstico de la gestión de remanentes sólidos en el Perú.* Obtenido de https://sinia.minam.gob.pe

MINAM. (2023). *Informe Nacional de remanentes Sólidos Municipales.* Obtenido de https://sinia.minam.gob.pe

Ministerio del Ambiente . (2017). Patrones de Condicion Ambiental (ECA) para Superficie. *Diario Oficial El Peruano*.

Montano, Y., Tapia, P. M., Fow, A., & Fuentealba, B. (2022). Fitorremediación. Una alternativa para tratar la polucion ambiental (Folleto). *Dirección de Investigación en Ecosistemas de Montaña(DIEM-INAIGEM)*.

Municipalidad Provincial de Puno. (2023). *Informe de gestión de residuos sólidos urbanos.* Obtenido de https://munipuno.gob.pe

Neaman, A. (2022). *Fitoextracción de elementos desde superficies poluantes: Una idea utópica.* Universidad de Tarapacá.

Novelo, R. I., Sandoval, E. C., & Riancho, M. (2002). *Influencia del material cubierta en la mezcla de los lixiviados de un relleno sanitario.*

ONU Medio Ambiente. (2020). *Perspectiva de la Gestión de Remanentes en América Latina y el Caribe.* Obtenido de https://www.unep.org/es

Ortiz Dongo, L., Pérez Porras, W., & Solórzano Acosta, R. (2023). *Guía práctica para la producción de Vermicompost (humus).* Instituto Nacional de Innovación Agraria.

Pacompia Coaquira, T. G. (2023). *Efecto por lixiviados del vertedero municipal en superficie por elementos pesados distrito de Ilave – 2023.* Ilave, Puno: Universidad Privada San Carlos. Obtenido de https://repositorio.upsc.edu.pe/bitstream/handle/UPSC/620/Tony_Gaston_PACOMPIA_COAQUIRA.pdf

Rohit, R., Ranjan , R., & Prodyut , D. (2022). Phytoremediation of heavy metals in soil and water. *Science of The Total Environmen, 846*(10), 157301. doi:https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157301

Ruby, M. V. (1999). dvances in evaluating the oral bioavailability of inorganics in soil for use in human health risk assessment. *Environmental Science & Technology, 33*(21), 3697 - 3705.

Silva Mori, K. (2024). itorremediación con Medicago sativa y Taraxacum officinale para remediar superficies poluantes con elementos pesados. *Revista Científica REACAE*. Obtenido de https://revistas.unsm.edu.pe/index.php/reacae/article/view/649

Silva Mori, K., Ramírez Ramírez, W., Chuquimbalqui Marina, D., & Azabache Aliaga, Y. (2024). Fitorremediación con Medicago sativa y Taraxacum officinale para la recuperación de superficies poluantes con elementos pesados de un vertedero. *Revista Amazónica de Ciencias Ambientales y Ecológicas, 3*(1), 649. doi:10.51252/reacae.v3i1.e649

Sossou, K. e. (2024). Características del lixiviado de vertedero e implicaciones para su tratamiento. *Cleaner Chemical Engineering*, 100161.

Steliga, T., & Dorota, K. (2020). *Aplicación de Festuca arundinacea en la fitorremediación de superficies poluantes con Pb, Ni, Cd e hidrocarburos de petróleo.* doi:10.1016/j.ecoenv.2020.110409

Susarla, S., Medina, V. F., & McCutcheon, S. C. (2002). *Fitorremediación: Una solución ecológica a la polucion química orgánica.* Ecological Engineering.

Tarrillo, E., Arce Inga, M., Torres Herrera, P. A., Tineo , D., Taboada Mitma, V. H., Cruz Luis, J., . . . Goñas, M. (2025). Distribución geoespacial de metales pesados en suelos arroceros del noroeste de Perú. *scientific reports*, 30692. doi:https://doi.org/10.1038/s41598-025-16638-6

Tchobanoglous, G., Theisen, H., & Vigil, A. (1994). *Gestión integral de remanentes sólidos.* Madrid: Mc Graw – Hill.

Torres Quispe, N. (2018). *Examen de la junta de elementos pesados (As, Cu, Cd, Hg y Pb) en el botadero de Cancharani, Puno.* Puno: Universidad Nacional del Altiplano. Obtenido de https://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/9412

Torres Quispe, N. E. (2018).E*xamen de la junta de elementos pesados como As, Cu, Cd, Hg Y Pb en el vertedero de Cancharani de Puno.* Puno: Universidad Nacional del Altiplano. Obtenido de https://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14082/9412/Torres_Quispe_Nely_Elma.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Trelles P A , G., & García López, Y. J. (2022). Fitorremediación para recuperar superficies poluantes por elementos pesados: discusión de revisión sistemática. *Revista Agroindustrial Science, 12*(3), 293-303. Obtenido de https://revistas.unitru.edu.pe/index.php/agroindscience/article/view/4951

Uriña, A. (2022). *Estudio de Elementos Pesados, Cadmio y Plomo, en el suelo de Cultivo de Banano (Musa Paradisiaca), en la Hacienda "Chaparral".* Cantón Balzar.

Valarezo, J. X., Carrillo Zenteno, M. D., Rubio Zapata, G. A., Peña Salazar, K. E., & García Orellana, Y. (2022). *Omisión de macronutrientes y biodisponibilidad de cadmio en superficies de Ecuador.* Acta Agronómica.

Van der Ent, A. B. (2013). *Hiperacumulación de metales en plantas: prospección de biodiversidad para la tecnología de fitorremediación.*

Van der Ent, A. B. (2013). Hiperacumulación de metales en plantas: prospección de biodiversidad para la tecnología de fitorremediación. *New Phytologist, 199*(3), 1-10.

Venegas Casanova, C. (2016). *Cabida extracción de tipo Stipa ichu en los pasivos ambientales mineros en la planta concentradora de Huari – La Oroya de la UNCP.* Lima: UAP. Obtenido de https://repositorio.uap.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12990/5783/Tesis_Capacidad_Extracci%C3%B3n_Especie.pdf?isAllowed=y&sequence=1&utm_source=chatgpt.com

Yan, A., Wang, Y., Swee , N., Mohamed , L., Ghosh, S., & Chen, Z. (2020). Phytoremediation: A Promising Approach for Revegetation of Heavy Metal-Polluted Land. *Sec. Plant Biotechnology, 11*. doi:https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00359

ANEXOS

TESIS UANCV
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN
"OFICINA DE INVESTIGACIÓN"

ANEXO 1. MATRIZ DE CONSISTENCIA

Título: FITORREMEDIACIÓN DE PLOMO, CADMIO Y COBRE EN SUELOS ALEDAÑOS AL BOTADERO DE CANCHARANI MEDIANTE STIPA ICHU Y FESTUCA DOLICHOPHYLLA PUNO 2025

PROBLEMAS DE INVESTIGACIÓN	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	DIMENSIONES	INDICADORES	METODOLOGÍA
Problema General: ¿Cuál es la eficiencia de la fitorremediación de plomo (Pb), cadmio (Cd) y cobre (Cu) en suelos aledaños al botadero de Cancharani mediante *Stipa ichu* y *Festuca dolichophylla* en Puno, 2025?	**Objetivo General:** Evaluar la eficiencia de la fitorremediación de plomo, cadmio y cobre en suelos aledaños al botadero de Cancharani mediante *Stipa ichu* y *Festuca dolichophylla* en Puno, 2025.	**Hipótesis General:** La aplicación de *Stipa ichu* y *Festuca dolichophylla* reduce significativamente las concentraciones de plomo, cadmio y cobre en los suelos aledaños al botadero de Cancharani.	**Variable Independiente:** Fitorremediación mediante especies vegetales.	- Tipo de especie vegetal.- Capacidad de absorción.- Desarrollo vegetativo.	- Biomasa producida.- Altura de planta.- Concentración de metales en tejidos vegetales.	**Tipo:** Aplicada. **Nivel:** Explicativo. **Diseño:** Experimental o cuasiexperimental. **Método:** Científico, analítico y estadístico.
Problema Específico 1: ¿Cuál es la concentración inicial de Pb, Cd y Cu en los suelos aledaños al botadero de Cancharani?	**Objetivo Específico 1:** Determinar la concentración inicial de Pb, Cd y Cu en los suelos aledaños al botadero de Cancharani.	**Hipótesis Específica 1:** Los suelos presentan concentraciones de Pb, Cd y Cu superiores a los niveles de referencia ambiental.		- Contaminación por Pb.- Contaminación por Cd.- Contaminación por Cu.	- mg/kg de Pb.- mg/kg de Cd.- mg/kg de Cu.	Técnicas: Muestreo de suelo y análisis de laboratorio.
Problema Específico 2: ¿Cuál es la capacidad de acumulación de Pb, Cd y Cu de *Stipa ichu* y *Festuca dolichophylla*?	**Objetivo Específico 2:** Determinar la capacidad de acumulación de Pb, Cd y Cu en *Stipa ichu* y *Festuca dolichophylla*.	**Hipótesis Específica 2:** *Stipa ichu* y *Festuca dolichophylla* presentan diferente capacidad de acumulación de Pb, Cd y Cu en raíces y parte aérea.		- Bioacumulación en raíces.- Bioacumulación en tallos y hojas.	- Concentración de Pb en tejidos (mg/kg).- Concentración de Cd en tejidos (mg/kg).- Concentración de Cu en tejidos (mg/kg).	Instrumentos: Fichas de campo y reportes de laboratorio.
Problema Específico 3: ¿Qué especie presenta mayor eficiencia en la remoción de Pb, Cd y Cu del suelo contaminado?	**Objetivo Específico 3:** Comparar la eficiencia de remoción de Pb, Cd y Cu entre *Stipa ichu* y *Festuca dolichophylla*.	**Hipótesis Específica 3:** *Stipa ichu* presenta mayor eficiencia de remoción de Pb, Cd y Cu que *Festuca dolichophylla*.	**Variable Dependiente:** Remoción de metales pesados del suelo.	- Reducción de Pb.- Reducción de Cd.- Reducción de Cu.- Eficiencia de remoción.	- % de reducción de Pb.- % de reducción de Cd.- % de reducción de Cu.- Factor de bioacumulación (FBA).- Factor de translocación (FT).	Análisis estadístico: Prueba t, ANOVA o comparación de medias según diseño experimental.

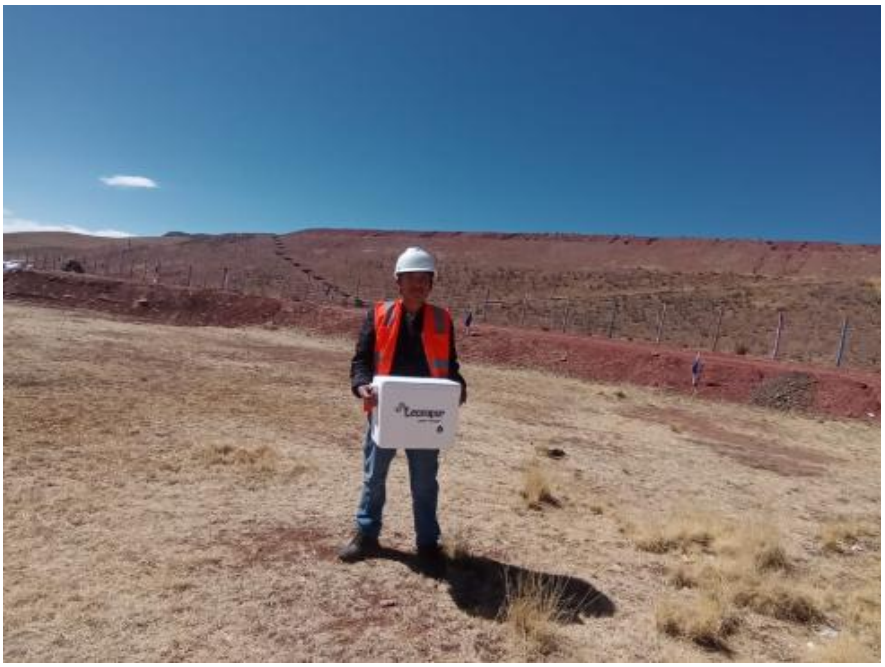
OFICINA DE INVESTIGACIÓN
Tesis Publicada con autorización del autor
http://repositorio.uancv.edu.pe/

ANEXO 2.

Panel fotográfico



Fotografía 01: Extracción manual de muestra de suelo para análisis fisicoquímico en el botadero de Cancharani.



Fotografía 02: Toma de muestras de campo de suelo del botadero.



Fotografía 03: Preparado de ensayos de fitorremediación y con Humus.



Fotografía 04: Trasplantación de las especies en condiciones saludables.



Fotografía 05: Monitoreo y riego de nuestros ensayos de fitorremediación.



Fotografía 06: Toma de muestras de suelo posterior a los 60 días.

ANEXO 3:

Normativa en materia de ECA – Suelo

N°	Parámetros	Usos del Suelo			Método de Ensayo
		Suelo Agrícola	Suelo Residencia/ Parques	Suelo Comercial/ Industrial/ Extractivos	
I	**orgánicos**				
1	Benceno (mg/kg MS)	0,03	0,03	0,03	EPA 8260-B EPA 8021-B
2	Tolueno (mg/kg MS)	0,37	0,37	0,37	EPA 8260-B EPA 8021-B
3	Etilbenceno (mg/kg MS)	0,082	0,082	0,082	EPA 8260-B EPA 8021-B
4	Xileno (mg/kg MS)	11	11	11	EPA 8260-B EPA 8021-B
5	Naftaleno (mg/kg MS)	0,1	0,6	22	EPA 8260-B
6	Benzo(a) pireno (mg/kg MS)	0,1	0,7	0,7	EPA 8270-B
6	Fracción de hidrocarburos F1 (C6-C10) (mg/kg MS)	200	200	500	EPA 8015-B
7	Fracción de hidrocarburos F2 (>C10-C28) (mg/kg MS)	1200	1200	5000	EPA 8015-M
8	Fracción de hidrocarburos F3 (>C28-C40) (mg/kg MS)	3000	3000	6000	EPA 8015-D
10	Bifenilos policlorados – PCB (mg/kg MS)	0,5	1,3	33	EPA 8270-D
11	Aldrin (mg/kg MS)	2	4	10	EPA 8270-D
12	Endrin (mg/kg MS)	0,01	0,01	0,01	EPA 8270-D
13	DDT (mg/kg MS)	0,7	0,7	12	EPA 8270-D
14	Heptacloro (mg/kg MS)	001	001	001	EPA 8270-D
II	**Inorgánicos**				
15	Cianuro libre (mg/kg MS)	0,9	0,9	8	EPA 9013-A/APHA-AWWA-AEF4500 CN F
16	Arsenico total (mg/kg MS)	50	50	140	EPA 3050-B EPA 3051
17	Bario total (mg/kg MS)	750	500	2000	EPA 3050-B EPA 3051
18	Cadmio total (mg/kg MS)	1.4	10	22	EPA 3050-B EPA 3051
19	Cromo VI (mg/kg MS)	0,4	0,4	1,4	DIN 19734
20	Mercurio total (mg/kg MS)	6.6	6.6	24	EPA 7471-B
21	Plomo total (mg/kg MS)	70	140	1200	EPA 3050-B EPA 3051

Fuente: (MINAM, 2013).

ANEXO 4:

Estándares de Calidad Ambiental para el Suelo – Perú y los Soil Quality Guidelines for the Protection of Environmental.

Nombre químico	ECA Peruano suelo agrícola (mg/kg)	CEQG Canadienses suelo agrícola (mg/kg)
Antimonio (Sb)	-	20
Arsénico (As)	*50	*12
Cadmio (Cd)	1.4	1.4
Cromo (Cr)	-	64
Cobre (Cu)	-	63
Plomo (Pb)	70	70
Mercurio (Hg)	6.6	6.6
Molibdeno (Mo)	-	5
Níquel (Ni)	-	50
Plata (Ag)	-	20
Talio (TI)	-	1
Estaño (Sn)	-	5
Zinc (Zn)	-	200

CEQG: Canadian Enwonmental Quahty Guidehnes (Normas de Calidad Ambiental Canadienses). ECA: Etandares de calidad Ambiental.

VALIDACION DE INSTRUMENTO

FITORREMEDIACIÓN DE PLOMO, CADMIO Y COBRE EN SUELOS ALEDAÑOS AL BOTADERO DE CANCHARANIMEDIANTE STIPA ICHU Y FESTUCA DOLICHOPHYLLA PUNO 2025

OPINIÓN DE EXPERTO

I. DATOS DEL EXPERTO

NOMBRE DEL VALIDADOR:	EDWIN MAYTA OTAZU
ESPECIALIDAD DEL VALIDADOR:	Ing. Sanitario y Ambiental
AUTOR DEL INSTRUMENTO:	JORGE RAUL ZONA CASSA

II. PUNTOS DE VALIDACION

DIMENSIONES	INDICADORES	DEFICIENTE 0 – 20%	REGULAR 21 – 40%	BUENA 41 – 60%	MUY BUENA 61 – 80%	EXCELENTE 81–100%
1. CLARIDAD	Esta formulado con lenguaje apropiado					98
2. OBJETIVIDAD	Esta expresado en base a la realidad local					95
3. ACTUALIDAD	Adecuado al avance de la ciencia					94
4. ORGANIZACIÓN	Existe una organización lógica					98
5. SUFICIENCIA	Comprende los aspectos en calidad y calidad					97
6. INTENCIONALIDAD	Adecuado para la mejora de las unidades de estudio					95
7. CONSISTENCIA	Basado en aspectos teóricos - científicos					96
8. COHERENCIA	Entre los índices indicadores y las dimensiones					96
9. METODOLOGIA	La estrategia responde al propósito del diagnostico					94

III. OPINION DE APLICATIBILIDAD:

- El instrumento cumple puntualmente con los requisitos para su aplicación..... ✖
- El instrumento no cumple puntual mente con los requisitos para su aplicación..... ○

IV. PROMEDIO DE VALORACION: 95.88%

Ing. Edwin Mayta Otazu
INGENIERO SANITARIO Y AMBIENTAL
CIP: N° 398871

VALIDACION DE INSTRUMENTO

FITORREMEDIACIÓN DE PLOMO, CADMIO Y COBRE EN SUELOS ALEDAÑOS AL BOTADERO DE CANCHARANIMEDIANTE STIPA ICHU Y FESTUCA DOLICHOPHYLLA PUNO 2025

OPINIÓN DE EXPERTO

I. DATOS DEL EXPERTO

NOMBRE DEL VALIDADOR:	yane melenia coasaca payehuanca
ESPECIALIDAD DEL VALIDADOR:	mg. sanitario y ambiental
AUTOR DEL INSTRUMENTO:	JORGE RAUL ZONA CASSA

II. PUNTOS DE VALIDACION

DIMENSIONES	INDICADORES	DEFICIENTE	REGULAR	BUENA	MUY BUENA	EXCELENTE
		0 – 20%	21 – 40%	41 – 60%	61 – 80%	81–100%
19. CLARIDAD	Esta formulado con lenguaje apropiado					98 %
20. OBJETIVIDAD	Esta expresado en base a la realidad local					98%
21. ACTUALIDAD	Adecuado al avance de la ciencia					99%
22. ORGANIZACIÓN	Existe una organización lógica					98%
23. SUFICIENCIA	Comprende los aspectos en calidad y calidad					95%
24. INTENCIONALIDAD	Adecuado para la mejora de las unidades de estudio					98%
25. CONSISTENCIA	Basado en aspectos teóricos - científicos					99%
26. COHERENCIA	Entre los índices indicadores y las dimensiones					95%
27. METODOLOGIA	La estrategia responde al propósito del diagnostico					95%

III. OPINION DE APLICATIBILIDAD:

- El instrumento cumple puntualmente con los requisitos para su aplicación..... ✖
- El instrumento no cumple puntual mente con los requisitos para su aplicación.....○

IV. PROMEDIO DE VALORACION: 97.22%

Ing. Yane Melenia Coasaca Payehuanca
CIP Nº 308312
INGENIERO SANITARIO Y AMBIENTAL

VALIDACION DE INSTRUMENTO

FITORREMEDIACIÓN DE PLOMO, CADMIO Y COBRE EN SUELOS ALEDAÑOS AL BOTADERO DE CANCHARANIMEDIANTE STIPA ICHU Y FESTUCA DOLICHOPHYLLA PUNO 2025

OPINIÓN DE EXPERTO

I. DATOS DEL EXPERTO

NOMBRE DEL VALIDADOR:	EDWIN MAYTA OTAZU
ESPECIALIDAD DEL VALIDADOR:	Ing. Sanitario y Ambiental
AUTOR DEL INSTRUMENTO:	JORGE RAUL ZONA CASSA

II. PUNTOS DE VALIDACION

DIMENSIONES	INDICADORES	DEFICIENTE 0 – 20%	REGULAR 21 – 40%	BUENA 41 – 60%	MUY BUENA 61 – 80%	EXCELENTE 81–100%
1. CLARIDAD	Esta formulado con lenguaje apropiado					98
2. OBJETIVIDAD	Esta expresado en base a la realidad local					95
3. ACTUALIDAD	Adecuado al avance de la ciencia					94
4. ORGANIZACIÓN	Existe una organización lógica					98
5. SUFICIENCIA	Comprende los aspectos en calidad y calidad					97
6. INTENCIONALIDAD	Adecuado para la mejora de las unidades de estudio					95
7. CONSISTENCIA	Basado en aspectos teóricos - científicos					96
8. COHERENCIA	Entre los índices indicadores y las dimensiones					96
9. METODOLOGIA	La estrategia responde al propósito del diagnostico					94

III. OPINION DE APLICATIBILIDAD:

- El instrumento cumple puntualmente con los requisitos para su aplicación..... ✖
- El instrumento no cumple puntual mente con los requisitos para su aplicación..... ○

IV. PROMEDIO DE VALORACION: 95.88%

Ing. Edwin Mayta Otazu
INGENIERO SANITARIO Y AMBIENTAL
CIP: N° 398871

TESIS UANCV
TESIS UANCV
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN
"OFICINA DE INVESTIGACIÓN"
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN
"OFICINA DE INVESTIGACIÓN"

ANEXO 1
FORMULARIO DE AUTORIZACIÓN

AUTORIZACIÓN PARA LA INCORPORACIÓN DE LOS TRABAJOS DE INVESTIGACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL UANCV

Formato digital [X] Fecha de entrega: 28 – 04 - 2026

1. Datos del autor (es):

Nombres y Apellidos: JORGE RAUL ZONA CASSA
Dirección: PJ. LAS MERCEDES 235
DNI/Carné de Extranjería/Pasaporte N°: 75263035
Teléfono: 900 546 724 email: Jorgezonecruz@gmail.com
Nombres y Apellidos:
Dirección:
DNI/Carné de Extranjería/Pasaporte N°:
Teléfono: email:
Facultad y/o Escuela de Posgrado: FACULTAD DE INGENIERÍAS Y CIENCIAS PURAS
Escuela Profesional o Mención: ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL
Título o Grado Académico a optar: INGENIERO SANITARIO Y AMBIENTAL
Asesor: Ing. ADWAR RANULFO SANCHEZ CARREON
Esta obra se encuentra dentro de las siguientes denominaciones:
Trabajo de Investigación [ ] Tesis [X] Trabajo de Suficiencia Profesional [ ] Trabajo Académico [ ]
Título: FITORREMEDIACIÓN DE PLOMO, CADMIO Y COBRE EN SUELOS ALEDAÑOS AL BOTADERO DE CANCHARANI MEDIANTE STIPA ICHU Y FESTUCA DOLICHOPHYLLA PUNO 2025

Palabras claves, (3 a 5 términos): Fitorremediación, Stipa ichu, Festuca dolichophylla, humus, suelos contaminados, fitoestabilización, fitoextracción.

¿Esta obra se desarrolló en la UANCV [1, 2]?

1

[1] Indicar si su producción intelectual ha empleado recursos tales como, instalaciones, laboratorios, insumos, equipos, bases de datos, asesoría técnica por parte del personal de la UANCV, financiamiento, entré otros relacionados.
[2] Si su producción intelectual se desarrolló en la UANCV totalmente o parcialmente, deberá autorizar el depósito en el Repositorio de manera obligatoria.

OFICINA DE INVESTIGACIÓN
OFICINA DE INVESTIGACIÓN
Tesis Publicada con autorización del autor
http://repositorio.uancv.edu.pe/

TESIS UANCV
TESIS UANCV
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN
"OFICINA DE INVESTIGACIÓN"

2. Referencia de tesis:

☐ Bachiller ☒ Titulo ☐ 2da Especialidad ☐ Maestría ☐ Doctorado

3. Licencias:

a) Licencia estándar:

Bajo los siguientes términos, autorizo el depósito de mi tesis en el Repositorio Digital de la UANCV.

Con la autorización de depósito de mi producción Intelectual, otorgo a la Universidad Andina "Néstor Cáceres Velásquez" una licencia no exclusiva para reproducir, distribuir, comunicar al público, transformar (únicamente mediante su traducción a otros idiomas) y poner a disposición del público mi producción intelectual (incluido el resumen), en formato físico o digital, en cualquier medio, conocido o por conocerse, a través de los diversos servicios por la Universidad, creados o por crearse, tales como el Repositorio Digital de tesis UANCV, colección de producción intelectual, entre otros, en el Perú y en el extranjero por el tiempo y veces que considere necesarias, y libres de remuneraciones.

En virtud de dicha licencia, la Universidad Andina "Néstor Cáceres Velásquez" podrá reproducir mi producción intelectual en cualquier tipo de soporte y en más de un ejemplar, sin modificar su contenido, solo con propósitos de seguridad, respaldo y preservación.

Declaro que la producción intelectual es una creación de mi autoría y exclusiva titularidad, coautoría con titularidad compartida, y me encuentro facultado a conceder la presente licencia y, asimismo, garantizo que dicha producción intelectual no infringe derechos de autor de terceras personas.

La Universidad Andina "Néstor Cáceres Velásquez" consignará el nombre del y/o los autor(es) de la producción intelectual, y no le hará ninguna modificación más que la permitida en la licencia.

Autorizo su publicación (marque con una X)

☒ Sí, autorizo que se deposite inmediatamente.

☐ Sí, autorizo que se deposite a partir de la fecha (d/m/a): _____

☐ No autorizo.

b) Licencia CREATIVE COMMONS 4.0 INTERNACIONAL:

Si usted concede una licencia CREATIVE COMMONS sobre su producción intelectual, mantiene la titularidad de los derechos de autor de esta y, a la vez, permite que otras personas puedan reproducirla, comunicarla al público y distribuir ejemplares de esta, bajo las condiciones siguientes:

¿Quiere permitir usos comérciales de su producción intelectual?

Sí: significa que usted permite la reproducción, distribución y comunicación pública de la producción intelectual incluso con fines comerciales.

No: significa que usted permite la reproducción, y comunicación pública de la producción intelectual, pero sin fines comerciales.

☐ Sí autorizo

☒ No autorizo

OFICINA DE INVESTIGACIÓN
http://repositorio.uancv.edu.pe/
OFICINA DE INVESTIGACIÓN
Tesis Publicada con autorización del autor
http://repositorio.uancv.edu.pe/

TESIS UANCV
TESIS UANCV
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN
"OFICINA DE INVESTIGACIÓN"

Jurisdicción de su Licencia

Todas las licencias CREATIVE COMMONS son de ámbito mundial, sin embargo, usted puede elegir entre la opción "internacional" o una adaptada a su jurisdicción, como para el caso peruano.

La opción "internacional" emplea el lenguaje y la terminología de los tratados internacionales; en cambio, la adaptada a su jurisdicción, recoge las particularidades de la legislación peruana.

En consecuencia, **la opción "internacional" goza de una mayor eficacia a nivel mundial, gracias a que tiene jurisdicción neutral**. Mientras que la opción adaptada a la jurisdicción del Perú goza de una mayor eficacia ante los tribunales peruanos.

☐ Internacional

☒ Nacional

Línea de investigación: CONTAMINACIÓN Y CALIDAD AMBIENTAL – P22



Firma de Autor | huella digital | 28 - 04 - 2026 Fecha

OFICINA DE INVESTIGACIÓN
Tesis Publicada con autorización del autor
http://repositorio.uancv.edu.pe/
OFICINA DE INVESTIGACIÓN
Tesis Publicada con autorización del autor
http://repositorio.uancv.edu.pe/