

PROVEIDO 000011-2026-UNH/FCI

EXPEDIENTE : **EPIAS020260000001**

ASUNTO: SE REMITE LA DESIGNACIÓN DE JURADOS PARA INFORME FINAL DE TESIS,
MEDIANTE ACTO RESOLUTIVO

REFERENCIA : OFICIO N° 000003-2026-EPIAS DESIGNACIÓN DE JURADOS PARA INFORME FINAL DE TESIS, MEDIANTE ACTO RESOLUTIVO

FECHA

07/01/2026

Atender en 0 días

SANCHEZ ARAUJO VICTOR GUILLERMO
DECANO(A)



"Decenio de la Igualdad de Oportunidades para Mujeres y Hombres"
"Año de la recuperación y consolidación de la economía peruana"

Huancavelica, 06 de Enero del 2026

OFICIO N° 000003-2026-UNH/EPIAS

Señor (a):

VICTOR GUILLERMO SANCHEZ ARAUJO

DECANO(A)

Presente. -

Asunto:

**DESIGNACIÓN DE JURADOS PARA INFORME FINAL DE TESIS,
MEDIANTE ACTO RESOLUTIVO.**

De mi consideración:

Es grato dirigirme a usted, para hacerle llegar el saludo cordial a nombre de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental y Sanitaria y el mío propio, en atención al documento de la referencia, solicito la aprobación mediante acto resolutivo a jurados evaluadores del informe final de tesis, el cual adjunto al presente los documentos de la referencia:

ASESOR:

Dr. WILFREDO SAEZ HUAMAN

CO-ASESOR

Mg. LUIS ALBERTO TITO CORDOVA

JURADOS:

M.Sc. MABEL YESICA ESCOBAR SOLDEVILLA

Mg. EDWIN JAVIER CCENTE CHANCHA

Mg. ALCIDIADES MERINO CARHUAPOMA

Dr. VICTOR GUILLERMO SANCHEZ ARAUJO

PRESIDENTE

SECRETARIO

VOCAL

ACCESITARIO

INFORME FINAL DE TESIS:

"REMEDIACIÓN DE SUELOS IMPACTADOS CON METALES TOTALES (CADMIO) A TRAVÉS DE LA ESPECIE *Polylepis incana* (Queñua) EN LA MINA DE SANTA BÁRBARA-AÑO 2025"

PRESENTADO POR:

DANAI ROSMERY MANCHA MEZA

ARMANDO ANTONIO VERA ROJAS

Hago propicia la oportunidad para expresarle el testimonio de mi especial consideración y estima personal.

Atentamente,

Documento Firmado Digitalmente

CARLOS DUEÑAS JURADO

DIRECTOR(A) DE ESCUELA PROFESIONAL

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA AMBIENTAL Y SANITARIA

N° Expediente: EPIAS020260000001



"Esta es una copia auténtica imprimible de un documento electrónico archivado por la Universidad Nacional de Huancavelica, aplicando lo dispuesto por el Art. 25 de D.S. 070-2013-PCM y la Tercera Disposición Complementaria Final del D.S. 026-2016-PCM".
Su autenticidad e integridad pueden ser contrastadas a través.
Dirección web: <https://sgd.unh.edu.pe:8181/verifica/inicio.do>
Clave: 03T4TLL





UNH

UNIVERSIDAD NACIONAL DE
HUANCAMELICA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA
AMBIENTAL Y SANITARIA

"Decenio de la Igualdad de Oportunidades para Mujeres y Hombres"
"Año de la recuperación y consolidación de la economía peruana"

CDJ/hcq
cc.:



N° Expediente: EPIAS020260000001



"Esta es una copia auténtica imprimible de un documento electrónico archivado por la Universidad Nacional de Huancavelica, aplicando lo dispuesto por el Art. 25 de D.S. 070-2013-PCM y la Tercera Disposición Complementaria Final del D.S. 026-2016-PCM".
Su autenticidad e integridad pueden ser contrastadas a través.
Dirección web: <https://sgd.unh.edu.pe:8181/verifica/inicio.do>
Clave: 03T4TLL



Anexo 02
Ficha de evaluación del informe final de tesis.
(pregrado)



UNIVERSIDAD NACIONAL DE HUANCVELICA
(Creada por ley N° 25265)
FACULTAD DE CIENCIAS DE INGENIERIA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA AMBIENTAL Y SANITARIA



FICHA DE EVALUACIÓN DE INFORME DE TESIS

Título de la tesis	REMEDIACIÓN DE SUELOS IMPACTADOS CON METALES TOTALES (CADMIO) A TRAVÉS DE LA ESPECIE Polylepis incana (Queñua) EN LA MINA DE SANTA BÁRBARA – AÑO 2025
Tesistas	Est. Armando Antonio, VERA ROJAS Est. Danai Rosmery, MANCHA MEZA
Asesor Coasesor	Dr. Wilfredo, SAEZ HUAMAN Mg. Luis Alberto, TITO CORDOVA
Jurado Evaluador	Presidente: MSc. Mabel Yesica, ESCOBAR SOLDEVILLA
	Secretario: Mg. Edwin Javier, CCENTE CHANCHA
	Vocal: Mg. Alcidiades, MERINO CARHUAPOMA

INCOMPLETO (1)

BUENO (2)

MUY BUENO (3)

CRITERIOS DE EVALUACIÓN				
TÍTULO		1	2	3
1	El título es claro y preciso (15 a 20 palabras)			X
2	Precisa la(s) variable(s) y la población de estudio.			X
RESUMEN		1	2	3
3	Contiene el problema u objetivo de investigación, población y/o muestra.			X
4	Precisa el método, técnica e instrumentos de estudio.			X
5	Precisa los resultados, conclusiones y palabras clave.			X
6	Tiene un máximo de 250 palabras y están redactadas en un solo párrafo.			X
INTRODUCCIÓN		1	2	3
7	Contiene el problema de investigación y los antecedentes de estudio.			X
8	Se señala los objetivos de investigación y la hipótesis.			X
9	Describe brevemente el estudio y presenta la estructura del informe de investigación.			X
CAPÍTULO I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA				
DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA		1	2	3
10	Describe el problema con fundamentación teórica y empírica.		X	
11	Delimita y contextualiza el problema.		X	
12	La redacción del planteamiento del problema es coherente.		X	
FORMULACIÓN DEL PROBLEMA		1	2	3
13	La formulación del problema está redactada sin ambigüedad.		X	

14	El problema presenta la(s) variable(s) el propósito y la población (considerar problema general y específicos).		X	
OBJETIVOS		1	2	3
15	El objetivo general evidencia el propósito del estudio			X
16	Los objetivos responden al problema de investigación.			X
17	Los objetivos específicos se derivan del objetivo general y son factibles de alcanzar.			X
JUSTIFICACIÓN		1	2	3
18	Se exponen las razones ¿por qué? y ¿para qué? del estudio.			X
LIMITACIONES		1	2	3
19	Explica las limitaciones en el control de la(s) variable(s), selección de la muestra, instrumentos de medición y la generalización de los resultados.			X
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO				
ANTECEDENTES		1	2	3
20	Presenta antecedentes relacionadas a la(s) variable(s) de estudio a nivel internacional, nacional, regional y local.			X
21	En los antecedentes se mencionan el problema u objetivo, metodología, población, resultados y conclusiones.			X
BASES TEÓRICAS		1	2	3
22	La organización de las bases teóricas es coherente y corresponde a las variables de estudio.		X	
23	Las bases teóricas fundamentan las variables de estudio.		X	
DEFINICIÓN DE TÉRMINOS		1	2	3
24	Precisa los conceptos más relevantes del estudio.		X	
25	Define los conceptos más relevantes según fuentes en orden alfabético no menor de 10 términos.		X	
HIPÓTESIS		1	2	3
26	La hipótesis se enuncia de manera clara y precisa.		X	
27	La hipótesis responde al problema de investigación.		X	
VARIABLES		1	2	3
28	Identifica(n) con precisión la(as) variable(s) de estudio		X	
OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES		1	2	3
29	Operacionaliza correcta y coherentemente la(s) variable(s), dimensiones, indicadores e ítems.		X	
CAPÍTULO III. MATERIALES Y MÉTODOS		1	2	3
30	Identifica el ámbito de estudio.			X
31	Selecciona y fundamenta el tipo y nivel de investigación.		X	
32	Existe correspondencia entre nivel y diseño de investigación.		X	
33	Describe los métodos de investigación.		X	
34	Señala la población y muestra de estudio.		X	
35	Selecciona y fundamenta el tipo de muestreo a utilizar.		X	
36	Selecciona las técnicas e instrumentos a utilizar en el estudio.		X	
37	Fundamenta la elaboración y aplicación del instrumento.		X	
38	Precisa los procedimientos para la recolección de datos.		X	
39	Especifica la(s) técnica(s) estadística(s) a utilizar en el análisis de datos.		X	
CAPÍTULO IV: DISCUSIÓN DE RESULTADOS				
ANÁLISIS DE INFORMACIÓN y PRUEBA DE HIPÓTESIS		1	2	3
40	Describe en forma detallada y secuencial los resultados y se corresponden con los objetivos.			X

41	Las tablas y las figuras sirven de complemento para la descripción de los resultados.			X
DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS		1	2	3
42	Interpreta y justifica los resultados.			X
43	Explica la relación de los resultados con los antecedentes, bases teóricas y la hipótesis.			X
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		1	2	3
44	Las conclusiones se sustentan en los resultados y responden a los objetivos.			X
45	Las recomendaciones se corresponden con las conclusiones, se dirige a instituciones autoridades o personas para implementar los hallazgos del estudio y sugiere nuevas investigaciones.			X
REFERENCIAS		1	2	3
46	Las citas y referencias se corresponden con el estilo de redacción.			X
47	Todas las citas están referenciadas.			X
ANEXOS		1	2	3
48	Incluye la matriz de consistencia, validación del instrumento, instrumentos utilizados, consentimiento informado, base de datos, evidencia de aplicación de instrumento y otros de acuerdo a la naturaleza del estudio.			X

CONTEO TOTAL DE MARCAS		0	22	26
(realice el conteo de marcas en cada una de las tres categorías de la escala y anote)		A	B	C

$$\text{Puntaje Total} = 1(A) + 2(B) + 3(C) = 1(0) + 2(22) + 3(26) = 122$$

Para el resultado final, ubicar el puntaje obtenido en la siguiente tabla:

RESULTADO	INTERVALO
Desaprobado	1 – 48
Replantear	49 – 97
Aprobado	98 – 144

Nombre del asesor: Dr. Wilfredo, SAEZ HUAMAN
Nombre del Coasesor: Mg. Luis Alberto, TITO CORDOVA

Huancavelica, 29 de diciembre de 2025

 Firmado digitalmente por ESCOBAR SOLDEVILLA Mabel Yesica FAU 20168014962 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 31.12.2025 11:09:29 -05:00

Presidente

 Firmado digitalmente por CCENTE CHANCHA Edwin Javier FAU 20168014962 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 31.12.2025 10:22:21 -05:00

Secretario

 Firmado digitalmente por MERINO CARHUAPOMA Alcidiades FAU 20168014962 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 30.12.2025 17:06:26 -05:00

Vocal

 Firmado digitalmente por SAEZ HUAMAN Wilfredo FAU 20168014962 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 29.12.2025 16:56:19 -05:00

Asesor

 Firmado digitalmente por TITO CORDOVA Luis Alberto FAU 20168014962 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 30.12.2025 09:28:08 -05:00

Coasesor

* El presente formato de acta es flexible, debiendo contener mínimamente la información descrita.



UNH

UNIVERSIDAD NACIONAL DE
HUANCVELICA

INVESTIGACIÓN - EPIAS



Firmado digitalmente por SAEZ
HUAMAN Wilfredo FAU 20168014962
soft
Cargo: Responsable De Investigacion
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 23.12.2025 16:43:43 -05:00

"Decenio de la Igualdad de Oportunidades para Mujeres y Hombres"
"Año de la recuperación y consolidación de la economía peruana"

Huancavelica, 23 de Diciembre del 2025

INFORME N° 000100-2025-UNH/INV-EPIAS

A: **CARLOS DUEÑAS JURADO**
DIRECTOR(A) DE ESCUELA PROFESIONAL
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA AMBIENTAL Y SANITARIA

ASUNTO: **PROPUESTA DE DESIGNACIÓN DE JURADOS PARA INFORME FINAL DE TESIS.**

Referencia: PROVEIDO 001158-2025-UNH/EPIAS (23DIC2025)

Fecha elaboración: Huancavelica, 23 de Diciembre de 2025

Tengo el agrado de dirigirme a usted para expresarle mi fraternal saludo, así mismo en relación al documento en referencia remito propuesta de estructuración de jurados evaluadores de la tesis titulado: **"Remediación de suelos impactados con metales totales (cadmio) a través de la especie *Polylepis incana* (Queñua) en la mina de Santa Bárbara – Año 2025"**, de los estudiantes: **Danai Rosmery, MANCHA MEZA y Armando Antonio, VERA ROJAS** de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental y Sanitaria, a fin de que su despacho remita a quien corresponda para su aprobación mediante acto resolutivo, para tal efecto se propone a los siguientes docentes:

- ✓ Dr. Victor Guillermo, SANCHEZ ARAUJO
- ✓ MSc. Mabel Yesica, ESCOBAR SOLDEVILLA
- ✓ Mg. Alcidiades, MERINO CARHUAPOMA
- ✓ Mg. Edwin, CCENTE CHANCHA
- ✓ Mg. Luis Alberto, TITO CORDOVA

Es cuanto tengo que informar a Ud., para su conocimiento y fines que estime conveniente.

Atentamente,

Documento Firmado Digitalmente

WILFREDO SÁEZ HUAMÁN
RESPONSABLE DE INVESTIGACION
INVESTIGACION - EPI AMBIENTAL

WSH
CC.:

N° Expediente: 2025-0032701



"Esta es una copia auténtica imprimible de un documento electrónico archivado por la Universidad Nacional de Huancavelica, aplicando lo dispuesto por el Art. 25 de D.S. 070-2013-PCM y la Tercera Disposición Complementaria Final del D.S. 026-2016-PCM".
Su autenticidad e integridad pueden ser contrastadas a través.
Dirección web: <https://sgd.unh.edu.pe:8181/verifica/inicio.do>
Clave: **NCUCBK5**





UNH

UNIVERSIDAD NACIONAL DE
HUANCAMELICA

INVESTIGACIÓN - EPIAS

"Decenio de la Igualdad de Oportunidades para Mujeres y Hombres"
"Año de la recuperación y consolidación de la economía peruana"



N° Expediente: 2025-0032701



"Esta es una copia auténtica imprimible de un documento electrónico archivado por la Universidad Nacional de Huancavelica, aplicando lo dispuesto por el Art. 25 de D.S. 070-2013-PCM y la Tercera Disposición Complementaria Final del D.S. 026-2016-PCM".
Su autenticidad e integridad pueden ser contrastadas a través.
Dirección web: <https://sgd.unh.edu.pe:8181/verifica/inicio.do>
Clave: **NCUCBK5**





UNH

UNIVERSIDAD NACIONAL DE
HUANCVELICAESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA
AMBIENTAL Y SANITARIAFirmado digitalmente por DUEÑAS
JURADO Carlos FAU 20168014962
soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 05.01.2026 15:52:28 -05:00"Decenio de la Igualdad de Oportunidades para Mujeres y Hombres"
"Año de la recuperación y consolidación de la economía peruana"**MEMORANDO MÚLTIPLE N° 000078-2025-UNH/EPIAS**

Señores: **MABEL YESICA ESCOBAR SOLDEVILLA**
DOCENTE NOMBRADO
DEPARTAMENTO ACADEMICO DE INGENIERIA AMBIENTAL Y SANITARIA
EDWIN JAVIER CCENTE CHANCHA
DOCENTE NOMBRADO
DEPARTAMENTO ACADEMICO DE INGENIERIA AMBIENTAL Y SANITARIA
ALCIDIADDES MERINO CARHUAPOMA
DOCENTE NOMBRADO
DEPARTAMENTO ACADEMICO DE INGENIERIA AMBIENTAL Y SANITARIA
VICTOR GUILLERMO SANCHEZ ARAUJO
DOCENTE NOMBRADO
DEPARTAMENTO ACADEMICO DE INGENIERIA AMBIENTAL Y SANITARIA

ASUNTO: **DESIGNACIÓN DE JURADOS PARA INFORME FINAL DE TESIS.**

Referencia: INFORME 000100-2025-UNH/INV-EPIAS (23DIC2025)

Fecha elaboración: Huancavelica, 29 de Diciembre de 2025

Por medio del presente me dirijo a Ustedes, de mi especial consideración y estima personal, al mismo tiempo en atención al documento de la referencia se designa como jurados evaluadores del Informe Final de Tesis **"REMEDIACIÓN DE SUELOS IMPACTADOS CON METALES TOTALES (CADMIO) A TRAVÉS DE LA ESPECIE *Polylepis incana* (Queñua) EN LA MINA DE SANTA BÁRBARA – AÑO 2025"** presentado por: **DANAI ROSMERY MANCHA MEZA Y ARMANDO ANTONIO VERA ROJAS**. Para su respectiva evaluación de acuerdo al del Reglamento de Grados y Títulos de la UNH., de acuerdo al siguiente detalle:

MABEL YESICA ESCOBAR SOLDEVILLA
EDWIN JAVIER CCENTE CHANCHA
ALCIDIADDES MERINO CARHUAPOMA
VICTOR GUILLERMO SANCHEZ ARAUJO

PRESIDENTE
SECRETARIO
VOCAL
ACCESITARIO

Hago propicia la oportunidad para expresarle el testimonio de mi especial consideración y estima personal.

Atentamente,

Documento Firmado Digitalmente

CARLOS DUEÑAS JURADO
DIRECTOR(A) DE ESCUELA PROFESIONAL
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA AMBIENTAL Y SANITARIA

CDJ/hcq

N° Expediente: 2025-0032701



"Esta es una copia auténtica imprimible de un documento electrónico archivado por la Universidad Nacional de Huancavelica, aplicando lo dispuesto por el Art. 25 de D.S. 070-2013-PCM y la Tercera Disposición Complementaria Final del D.S. 026-2016-PCM".
Su autenticidad e integridad pueden ser contrastadas a través.
Dirección web: <https://sgd.unh.edu.pe:8181/verifica/inicio.do>
Clave: XWY5KTQ





UNH

UNIVERSIDAD NACIONAL DE
HUANCAMELICA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA
AMBIENTAL Y SANITARIA

"Decenio de la Igualdad de Oportunidades para Mujeres y Hombres"
"Año de la recuperación y consolidación de la economía peruana"

ANEXO N° 01
DESTINATARIOS DEL MEMORANDO MULTIPLE



N° Expediente: 2025-0032701



"Esta es una copia auténtica imprimible de un documento electrónico archivado por la Universidad Nacional de Huancavelica, aplicando lo dispuesto por el Art. 25 de D.S. 070-2013-PCM y la Tercera Disposición Complementaria Final del D.S. 026-2016-PCM".
Su autenticidad e integridad pueden ser contrastadas a través.
Dirección web: <https://sgd.unh.edu.pe:8181/verifica/inicio.do>
Clave: XWY5KTQ



**SOLICITO: DESIGNACIÓN DE
JURADOS PARA INFORME
FINAL DE TESIS**

**SEÑOR DIRECTOR DE LA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA AMBIENTAL Y
SANITARIA DE LA FACULTAD DE CIENCIAS DE INGENIERIA DE LA UNIVERSIDAD
NACIONAL DE HUANCAMELICA.**

S.D.

MANCHA MEZA DANAI ROSMERY egresada de la
Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental y
Sanitaria, con DNI N° 72084978, con domicilio Jr.
María Prado de Bellido.

VERA ROJAS ARMANDO ANTONIO egresado de la
Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental y
Sanitaria, con DNI N° 71933655, con domicilio Av.
Augusto B. Leguía.

El motivo de la presente es **solicitar la designación de los jurados evaluadores** para el
Informe Final de Tesis, titulado:

**“Remediación de suelos impactados con metales totales (cadmio) a través de la especie
Polylepis incana (Queñua) en la mina de Santa Bárbara – Año 2025”**,

el cual ha sido revisado y cuenta con la conformidad del asesor, encontrándose apto para
continuar con los trámites académicos correspondientes, conforme a la normativa vigente de
la Universidad Nacional de Huancavelica.

ADJUNTAMOS:

- Solicitud
- Informe del Asesor
- Resolución correspondiente
- Informe Final de Tesis
- Reporte Turnitin

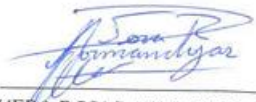
Sin otro particular y esperando una respuesta favorable a mi solicitud, quedo atento a cualquier
observación o requerimiento adicional

POR LO EXPUESTO:

Pido a Usted; Señor Director de la Escuela Profesional de
Ingeniería Ambiental y Sanitaria, acceder a mi petición por ser justo.

Huancavelica, 12 de agosto 2025


MANCHA MEZA DANAI ROSMERY
DNI N°72084978


VERA ROJAS ARMANDO ANTONIO
DNI N°71933655



UNIVERSIDAD NACIONAL DE HUANCAMELICA
(CREADA POR LEY Nº 25265)
FACULTAD DE CIENCIAS DE INGENIERÍA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y
SANITARIA



REVISIÓN DE INFORME FINAL DE TESIS

ASESOR: Dr. Wilfredo Sáez Huamán

COASESOR: Mg. Luis Alberto, TITO CORDOVA

ESTUDIANTE: Danai Rosmery Mancha Meza

Armando Antonio Vera Rojas

TÍTULO DE INFORME FINAL DE TESIS:

“Remediación de suelos impactados con metales totales (cadmio) a través de la especie Polylepis incana (queñua) en la mina de Santa Bárbara-Año 2025”.

OBSERVACIONES:

Luego de la revisión integral del Informe Final de Tesis, se constata que el documento cumple con los lineamientos metodológicos, técnicos y formales establecidos por la Escuela Profesional y la normativa vigente de la Universidad. El contenido presenta coherencia interna, adecuada fundamentación teórica, correcta aplicación de la metodología de investigación y consistencia en el análisis de resultados y conclusiones.

No se formulan observaciones adicionales, por lo que corresponde proseguir con los trámites académicos y administrativos correspondientes.

Huancavelica, 23 de diciembre, del 2025



Firmado digitalmente por SAEZ
HUAMAN Wilfredo FAU 20168014962
soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 23.12.2025 10:14:17 -05:00

ASESOR



Firmado digitalmente por TITO
CORDOVA Luis Alberto FAU
20168014962 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 23.12.2025 10:27:54 -05:00

CO-ASESOR



UNIVERSIDAD NACIONAL DE HUANCAMELICA
FACULTAD DE CIENCIAS DE INGENIERÍA



Decanatura

RESOLUCIÓN N° 0251-2025-D-FCI-R-UNH

Huancavelica, 15 de agosto de 2025.

VISTOS

Oficio N° 000416-2025-UNH/EPIAS (14-08-2025) proveído N° 001325 (15-08-2025) presentado por el Director de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental y Sanitaria, solicita modificación de la Resolución de Decano N° 350-2024-FCI-UNH (18-11-2024) por cambio de título del proyecto de tesis, a favor de Danai Rosmery Mancha Meza y Armando Antonio Vera Rojas de la Escuela Profesional Ingeniería Ambiental y Sanitaria, Facultad de Ciencias de Ingeniería, Universidad Nacional de Huancavelica y;

CONSIDERANDO

Que, de conformidad a lo establecido por el artículo 18° de la Constitución Política del Estado, artículo 8° de la Ley Universitaria N° 30220: El Estado reconoce la autonomía universitaria. La autonomía inherente a las universidades, se ejerce de conformidad con lo establecido en la Constitución, la presente Ley y demás normativa aplicable. Esta autonomía se manifiesta en lo normativo, de gobierno, académico, administrativo y económico en el marco de la ley; artículo 37° del Estatuto: Las Facultades gozan de autonomía académica, normativa, gubernativa, administrativa y económica, dentro del marco de la Ley y el Estatuto;

Que, según el artículo primero de la Resolución N° 009-2024-CEU-AU-UNH (16-12-2024), proclama como decano de la Facultad de Ciencias de Ingeniería al Dr. Víctor Guillermo Sánchez Araujo ganador en la elección realizada el día 11 de diciembre de 2024 en la Universidad Nacional de Huancavelica, por consiguiente, se acredita para todos los efectos legales y de representación, debiendo asumir sus funciones a partir del 03 de mayo del 2025 al 02 de mayo del 2029.

El artículo 1° de la ley de firmas y certificados digitales aprobado mediante Ley N° 27269 señala que la misma tiene por objetivo regular la utilización de las firmas electrónicas otorgándole la misma validez y eficacia jurídica que el uso de una firma manuscrita u otra análoga que conlleve manifestación de voluntad.

Que, en conformidad con el Reglamento de Grados y Títulos de la Universidad Nacional de Huancavelica (UNH) aprobado con Resolución N° 1068-2024-CU-UNH, de fecha 13-09-2024, VERSION 003, en su art. 12° De la elaboración, indica: El proyecto de tesis es elaborado por uno o dos bachilleres, egresados o estudiantes a partir del VIII ciclo de una misma escuela profesional (para el caso de la Escuela Profesional de Derecho y Ciencias Políticas a partir del X ciclo).

Que, según Resolución de Decano N° 350-2024-FCI-UNH, de fecha 18 de noviembre del 2024, en su artículo primero. - Se designa Dr. Wilfredo Sáez Huamán, Asesor y Mg. Luis Alberto Tito Córdova como Co-Asesor del proyecto de tesis titulado: "REHABILITACIÓN DE SUELOS EROSIONADOS A TRAVÉS DE LA ESPECIE *Polylepis Pacensis* (Queñua) EN LA PROVINCIA DE HUANCAMELICA-AÑO 2024", de la Escuela Profesional de Ingeniería



Este es un documento auténtico imprimible de un elemento electrónico archivado en la Universidad Nacional de Huancavelica, siguiendo lo dispuesto por el Art. 25° del D.S. 070.2013-PCM y la Tercera Disposición Complementaria Final del D.S. 026-2016-PCM. Su autenticidad e integridad pueden ser verificados a través de la siguiente dirección: <https://appunh.com/validar-documento/bb1db4ad-f8e5-4c66-acff-21d28ddb9f65/verificar>



UNIVERSIDAD NACIONAL DE HUANCAMELICA
FACULTAD DE CIENCIAS DE INGENIERÍA



Decanatura

RESOLUCIÓN N° 0251-2025-D-FCI-R-UNH

Huancavelica, 15 de agosto de 2025.

Ambiental y Sanitaria, Facultad de Ciencias de Ingeniería, Universidad Nacional de Huancavelica

Que, con proveído N° 001325 de fecha 15-08-2025, el Decano de la Facultad de Ciencias de Ingeniería, autoriza al Secretario Docente emitir la resolución correspondiente.

Que, en uso de las atribuciones que le confieren al Decano y al amparo de la Ley Universitaria N° 30220 y el Estatuto de la Universidad Nacional de Huancavelica.

SE RESUELVE

ARTÍCULO PRIMERO.- MODIFICAR el artículo primero y segundo de la Resolución de Decano N° 350-2024-FCI-UNH (18-11-2024) en el que se consigna el cambio de título del proyecto de tesis titulado "REMEDIACIÓN DE SUELOS IMPACTADOS CON METALES TOTALES (CADMIO) A TRAVÉS DE LA ESPECIE *Polylepis incana* (Queñua) EN LA MINA DE SANTA BÁRBARA-AÑO 2025", presentado por presentado por **Danai Rosmery Mancha Meza y Armando Antonio Vera Rojas** de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental y Sanitaria, Facultad de Ciencias de Ingeniería, Universidad Nacional de Huancavelica.

ARTÍCULO SEGUNDO.- DEJAR a salvo y subsistente los demás términos de la resolución.

ARTICULO TERCERO.- DERIVAR la presente resolución a la Dirección de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental y Sanitaria, Facultad de Ciencias de Ingeniería, Universidad Nacional de Huancavelica, para su conocimiento y trámite correspondiente.

Regístrese, comuníquese y archívese. -----



Firmado digitalmente por SANCHEZ
ARAUJO Víctor Guillermo FAU
20168014962 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 15.08.2025 15:55:02 -05:00

Dr. Víctor Guillermo Sánchez Araujo
Decano
Facultad de Ciencias de Ingeniería



Firmado digitalmente por SAEZ
HUAMAN Wilfredo FAU 20168014962
soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 15.08.2025 15:31:21 -05:00

Dr. Wilfredo Sáez Huamán
Secretario Docente
Facultad de Ciencias de Ingeniería



Este es un documento auténtico imprimible de un elemento electrónico archivado en la Universidad Nacional de Huancavelica, siguiendo lo dispuesto por el Art. 25° del D.S. 070.2013-PCM y la Tercera Disposición Complementaria Final del D.S. 026-2016-PCM. Su autenticidad e integridad pueden ser verificados a través de la siguiente dirección.
<https://appunh.com/validar-documento/bb1db4ad-f8e5-4c66-acff-21d28ddb9f65/verificar>



UNIVERSIDAD NACIONAL DE HUANCATELICA

(Creada por Ley N° 25265)

FACULTAD DE CIENCIAS DE INGENIERÍA

Ciudad Universitaria Paturpampa

RESOLUCIÓN DE DECANO N° 350-2024-FCI-UNH

Huancavelica, noviembre 18 del 2024.

VISTO:

El expediente, Oficio N° 000331-2024-UNH/EPIAS (12-11-2024) con proveído N° 001476 (13-11-2024) en 13 folios y un archivo digital formato pdf con contenido de la tesis, presentado por el Director de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental y Sanitaria, Facultad de Ciencias de Ingeniería, Universidad Nacional de Huancavelica; sobre designación de Asesor y aprobación de proyecto de tesis mediante resolución y;

CONSIDERANDO:

Que, según el artículo primero de la Resolución N° 005-2021-CEU-UNH (14-06-2021), proclama como ganador de las Elecciones, en el cargo de Decano de la Facultad de Ciencias de Ingeniería, al Mg. Pedro Antonio Palomino Pastrana, a partir del 03 de mayo del 2021 al 02 de mayo del 2025 y artículo tercero, dispone que los artículos primero y segundo de la presente resolución, los decanos ganadores de las elecciones entraran en vigencia para sus funciones académicas y administrativas a partir del 15 de junio del 2021 hasta la fecha de culminación para los cuales fueron elegidos.

Que, según el Reglamento de Grados y Títulos de la Universidad Nacional de Huancavelica Versión 003, aprobado con Resolución N° 1068-2024-CU-UNH, de fecha 13-09-2024, indica **Art. 13°** de la presentación y aprobación; **a)** El/los bachiller (s), egresado (s) o estudiante (s) presentara (n) un a solicitud dirigida al director de la Escuela Profesional, acompañado el proyecto de tesis en medio digital formato PDF, solicitando designación del asesor, debidamente ser un docente ordinario o contratado (A1 o B1) , el asesor y co-asesor pueden ser a propuesta del interesado. En caso de convenios o financiamientos con instituciones, un representante de dicha institución realizaría las funciones del asesor o co-asesor; **c)** el director de escuela profesional notifica el proyecto de investigación al asesor para su revisión en el plazo máximo de quince días (15) días hábiles, debiendo este emitir un informe al director de escuela profesional dando a conocer el resultado de la evaluación, adjunto el proyecto en un medio digital. **d)** en caso de ser favorable, el director de Escuela profesional solicita al decano la designación de asesor y aprobación del proyecto de tesis, con resolución de decano; para ser notificado al responsable de investigación de la Escuela Profesional para su inscripción. **e) una vez emitida la resolución de aprobación del proyecto de tesis, el o los interesados procederán a ejecutar el proyecto cuya vigencia no excederá de tres años (presentación de la tesis a la escuela profesional) a partir de la fecha de la notificación de la resolución. Vencido dicho plazo ellos interesados deberán presentar un nuevo proyecto de tesis;** en el **Art. 17°** fusiones del asesor; **a)** velar por la calidad de la tesis; **b)** cumplir con los pazos establecidos en el presente reglamento; **c)** Asesor y velar el cumplimiento del desarrollo de la tesis por parte del o los asesorados hasta la sustentación; **d)** verificar la originalidad de la tesis con el software anti plagio oficial de la UNH y **e)** Aprobar el proyecto de tesis y la tesis, de ser pertinente;

Que, el decano de la Facultad de Ciencias de Ingeniería, autoriza al secretario docente con proveído N° 001476 de fecha 13-11-2024, la emisión de la resolución correspondiente.

Que, en uso de las atribuciones que le confieren al Decano y al amparo de la Ley Universitaria N° 30220 y el Estatuto de la Universidad Nacional de Huancavelica.

SE RESUELVE:

ARTÍCULO PRIMERO.- DESIGNAR al Dr. Wilfredo Sáez Huamán, Asesor y Mg. Luis Alberto Tito Córdova como Co-Asesor del proyecto de tesis titulado: "REHABILITACIÓN DE SUELOS EROSIONADOS A TRAVÉS DE LA ESPECIE *Polylepis Pacensis* (Queñua) EN LA PROVINCIA DE HUANCATELICA-AÑO 2024", de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental y Sanitaria, Facultad de Ciencias de Ingeniería, Universidad Nacional de Huancavelica.

ARTÍCULO SEGUNDO.- APROBAR el proyecto de tesis titulado: "REHABILITACIÓN DE SUELOS EROSIONADOS A TRAVÉS DE LA ESPECIE *Polylepis Pacensis* (Queñua) EN LA PROVINCIA DE HUANCATELICA-AÑO 2024", presentado por **Danai Rosmery Mancha Meza y Armando Antonio Vera Rojas** de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental y Sanitaria, Facultad de Ciencias de Ingeniería, Universidad Nacional de Huancavelica.

ARTÍCULO TERCERO. - DERIVAR la presente Resolución a interesados, Asesor, Co-Asesor, responsable de Investigación y Dirección de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental y Sanitaria, Facultad de Ciencias de Ingeniería, Universidad Nacional de Huancavelica, para su conocimiento y trámite correspondiente.

Regístrese, comuníquese y archívese-----"



Firmado digitalmente por PALOMINO
PASTRANA Pedro Antonio FAU
20168014962 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 18.11.2024 17:17:23 -05:00

Dr. PEDRO ANTONIO PALOMINO PASTRANA
Decano



Firmado digitalmente por ARTICA
FELIX Marino FAU 20168014962 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 18.11.2024 10:55:08 -05:00

Ing. MARINO ARTICA FELIX
Secretario Docente

NOMBRE DEL TRABAJO

Remediación de suelos impactados con metales totales (Cadmio) a través de la especie polylepis incana (queñua) en la mina de Santa Bárbara-año 2025

AUTOR

Danai Rosmery Mancha Meza Armando Antonio Vera Rojas

RECuento DE PALABRAS

24007 Words

RECuento DE CARACTERES

136118 Characters

RECuento DE PÁGINAS

115 Pages

TAMAÑO DEL ARCHIVO

3.7MB

FECHA DE ENTREGA

Dec 22, 2025 12:16 PM GMT-5

FECHA DEL INFORME

Dec 22, 2025 12:23 PM GMT-5

● 20% de similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base de datos.

- 18% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 16% Base de datos de trabajos entregados
- 6% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

● Excluir del Reporte de Similitud

- Material bibliográfico
- Material citado
- Material citado
- Coincidencia baja (menos de 8 palabras)



Firmado digitalmente por SAEZ
HUAMAN Wilfredo FAU 20168014962
soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 22.12.2025 12:26:36 -05:00



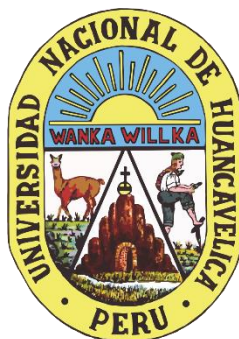
Firmado digitalmente por TITO
CORDOVA Luis Alberto FAU
20168014962 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 22.12.2025 15:04:08 -05:00

UNIVERSIDAD NACIONAL DE HUANCABELICA

(Creada por ley 25265)

FACULTAD DE CIENCIAS DE INGENIERÍA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y SANITARIA



TESIS

**Remediación de suelos impactados con metales totales
(Cadmio) a través de la especie *polylepis incana*
(queñua) en la mina de Santa Bárbara-año 2025**

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN

Gestión de la calidad ambiental

PRESENTADO POR:

Bach. Danai Rosmery Mancha Meza

Bach. Armando Antonio Vera Rojas

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO AMBIENTAL Y SANITARIO

HUANCABELICA, PERÚ

2025

Acta de sustentación

Certificado de similitud

Título

Remediación de suelos impactados con metales totales (Cadmio) a través de la especie
polylepis incana (*queñua*) en la mina de Santa Bárbara-año 2025

Asesor y Co-Asesor

Asesor:

Dr. Wilfredo Sáez Huamán

<https://orcid.org/0000-0002-1485-8273>

DNI: 23274838

Co-Asesor

Mg. Luis Alberto Tito Córdova

<https://orcid.org/0000-0003-0072-4140>

DNI: 40943298

Dedicatoria

A la tierra sabia de Huancavelica, cuna de montañas que guardan silencio y memoria.

A sus suelos heridos, que pese al daño siguen ofreciendo vida.

A la *queñua*, árbol noble de nuestros Andes, que nos recuerda que la naturaleza siempre busca sanar.

Y a todos quienes aman y protegen esta tierra, inspiración permanente para trabajar por un futuro más limpio y justo para nuestra Pachamama.

Danai Rosmery y Armando Antonio

Tabla de contenidos

Acta de sustentación.....	ii
Certificado de similitud.....	iii
Título.....	iv
Asesor y Co-Asesor	v
Dedicatoria	vi
Tabla de contenidos.....	vii
Tabla de contenidos de cuadros, gráficas y figuras.....	xi
Resumen.....	xiii
Abstract	xiv
Introducción	xv

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción del problema	18
1.2. Formulación del problema	21
1.2.1. Problema general.....	21
1.2.2. Problemas específicos	21
1.3. Objetivos	21
1.3.1. Objetivo general	21
1.3.2. Objetivos específicos.....	22
1.4. Justificación	22
1.4.1. Justificación teórica.....	22
1.4.2. Justificación práctico-social	23
1.4.3. Justificación metodológica.....	23
1.5. Limitaciones.....	24

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes	26
2.1.1. Antecedentes internacionales	26
2.1.2. Antecedentes nacionales	29
2.1.3. Antecedentes locales	32
2.2. Bases teóricas	35
2.2.1. Contaminación de suelos por metales pesados	35
2.2.1.1. Concepto de metales pesados.....	35
2.2.1.2. Origen de la contaminación por Cd en zonas mineras.....	36
2.2.1.3. Propiedades fisicoquímicas del cadmio (Cd).....	38
2.2.2. Suelo como sistema físico-químico y biológico.....	39
2.2.2.1. Concepto y funciones del suelo	39
2.2.2.2. Calidad del suelo y degradación	40
2.2.2.3. Propiedades físico-químicas del suelo relevantes para la remediación	42
2.2.2.4. Relación entre las propiedades del suelo y la movilidad del Cd.....	44
2.2.2.5. Interacción suelo – planta – microorganismo en zonas degradadas	45
2.2.3. Especie <i>Polylepis incana</i> (queñua) como agente de remediación	46
2.2.4.1. Características botánicas	46
2.2.4.2. Distribución geográfica y ecológica de <i>polylepis incana</i>	48
2.2.4.3. Importancia ecológica de <i>Polylepis</i> en ecosistemas altoandinos	52
2.2.4. Papel de las bacterias en la biorremediación del Cd (EM-COMPOST)	54
2.2.5.1. Bacterias resistentes a metales pesados (MRB).....	54
2.2.5.2. Rol de la rizósfera en la inmovilización del Cd	55
2.2.5.3. Interacciones: bacteria-planta-suelo en la fitoestabilización	56
2.3. Hipótesis	58
2.4. Definición de términos.....	58
2.5. Variables	60

2.6. Operacionalización de variables	61
--	----

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Ámbito temporal y espacial	64
3.2. Tipo de investigación	66
3.3. Nivel de investigación.....	66
3.4. Métodos de investigación	66
3.5. Diseño de investigación	67
3.6. Población, muestra y muestreo	69
3.6.1. Población.....	69
3.6.2. Muestra.....	69
3.6.3. Muestreo.....	70
3.7. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	70
3.8. Técnicas de procesamiento y análisis de datos	71

CAPÍTULO IV

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1. Análisis de información	73
4.1.1. Análisis Descriptivo de las variables (incluida Cd)	73
4.1.2. Análisis comparativo de los cambios físico-químicos del suelo.....	78
4.1.3. Análisis comparativo solo con <i>Polylepis incana</i> y solo con Inoculación bacteriana	85
4.1.4. Análisis relacional de Cd y variables edáficas	87
4.2. Proceso de prueba de hipótesis	90
4.2.1. Hipótesis general	90
4.2.2. Hipótesis específicas	91
4.3. Discusión de resultados.....	96

Conclusiones	99
Recomendaciones.....	101
Referencias bibliográficas.....	102
 Anexos	 107
1. Matriz de consistencia.....	108
2. Instrumentos (muestra).....	110
3. Matriz de datos en Excel	113
4. Matriz de datos en Jamovi	114
5. Evidencias fotográficas	115

Tabla de contenidos de cuadros, gráficas y figuras

Tablas:

Tabla 1 Propiedades físico químicas de los suelos	43
Tabla 2 Descripción de la distribución de especies de <i>Polylepis</i> , notas sobre la ecología y estado de conservación*	49
Tabla 3 Mecanismos para la fitoestabilización	57
Tabla 4 Matriz de operacionalización de las variables dependientes (medidas) en el estudio	61
Tabla 5 Protocolos estandarizados para la recolección de información.....	71
Tabla 6 Mediciones de propiedades físico-químicas de las parcelas de suelo y los tres tratamientos durante seis meses.....	75
Tabla 7 ANOVA de medidas repetidas para las cuatro condiciones de suelos durante seis meses	81
Tabla 8 Análisis comparativo de Cadmio (Cd) en suelo vs PP y suelo vs B.....	86
Tabla 9 Matriz de correlación parcial [♦] entre Cadmio y las propiedades físico-químicas del suelo.....	89

Figuras:

Figura 1 Especie <i>Polylepis incana</i> (queñua)	48
Figura 2 Observaciones geográficas (América) representan la presencia observada de una especie	51
Figura 3 Observaciones geográficas (Perú) representan la presencia observada de una especie	52
Figura 4 Gráfico de línea de los cambios del suelo en pH, Carbono, Fósforo, Nitrógeno, Potasio y CE, bajo cuatro condiciones	76

Figura 5 Gráfico de línea de los cambios del suelo en Capacidad de intercambio catiónico, Cadmio, Sodio, Magnesio y densidad aparente, bajo cuatro condiciones	77
---	----

Resumen

La contaminación de suelos por cadmio (Cd) constituye una problemática ambiental relevante en zonas mineras altoandinas, debido a su alta toxicidad y persistencia. La presente investigación tuvo como objetivo determinar el efecto de la incorporación de *Polylepis incana* (queñua) en la remediación de suelos impactados por cadmio en la mina de Santa Bárbara, durante el periodo marzo–agosto de 2025. Se empleó un diseño experimental con cuatro tratamientos: suelo sin intervención, suelo con *Polylepis incana*, suelo con inoculación bacteriana y suelo con *Polylepis incana* más inoculación bacteriana, evaluados durante seis meses. La concentración de Cd y las propiedades físico-químicas del suelo fueron analizadas mediante estadística descriptiva, análisis de varianza (ANOVA), prueba t de Student, análisis correlacional de Pearson y estadística bayesiana. Los resultados del ANOVA evidenciaron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos ($F = 7.39$; $p = 0.002$), siendo el tratamiento combinado el más eficiente en la reducción del Cd. La prueba t confirmó reducciones significativas tanto en parcelas con solo *Polylepis incana* ($p = 0.003$; $BF_{10} = 11.8$) como en parcelas con inoculación bacteriana ($p = 0.006$; $BF_{10} = 7.36$). El análisis correlacional mostró relaciones significativas entre el Cd y cationes intercambiables, así como con la densidad aparente del suelo. Se concluye que *Polylepis incana*, especialmente en combinación con bacterias, constituye una estrategia eficaz de fitoestabilización para la remediación de suelos contaminados con cadmio en ecosistemas altoandinos.

Palabras clave: cadmio; remediación de suelos; *Polylepis incana*; biorremediación; fitoestabilización; suelos mineros.

Abstract

Cadmium (Cd) soil contamination is a significant environmental problem in high Andean mining areas due to its high toxicity and persistence. The objective of this research was to determine the effect of incorporating Polylepis incana (queñua) in the remediation of cadmium-impacted soils at the Santa Bárbara mine during the period March–August 2025. An experimental design with four treatments was used: soil without intervention, soil with Polylepis incana, soil with bacterial inoculation, and soil with Polylepis incana plus bacterial inoculation, evaluated over a period of six months. The Cd concentration and the physical-chemical properties of the soil were analyzed using descriptive statistics, analysis of variance (ANOVA), Student's t-test, Pearson's correlation analysis, and Bayesian statistics. The ANOVA results showed statistically significant differences between treatments ($F = 7.39$; $p = 0.002$), with the combined treatment being the most efficient in reducing Cd. The t-test confirmed significant reductions in both plots with only Polylepis incana ($p = 0.003$; $BF_{10} = 11.8$) and plots with bacterial inoculation ($p = 0.006$; $BF_{10} = 7.36$). Correlational analysis showed significant relationships between Cd and exchangeable cations, as well as with apparent soil density. It is concluded that Polylepis incana, especially in combination with bacteria, constitutes an effective phytostabilization strategy for the remediation of cadmium-contaminated soils in high Andean ecosystems.

Keywords: cadmium; soil remediation; Polylepis incana; bioremediation; phytostabilization; mining soils.

Introducción

La contaminación de suelos por metales pesados se ha convertido en uno de los problemas ambientales más persistentes y complejos en zonas afectadas por actividades mineras. En particular, el cadmio (Cd) es un metal altamente tóxico que presenta elevada movilidad en suelos degradados, afectando la fertilidad, la salud de los ecosistemas, la seguridad alimentaria y el bienestar humano. Este fenómeno es especialmente crítico en regiones altoandinas como Huancavelica, donde existen numerosos pasivos mineros históricos que han dejado suelos con niveles significativos de contaminación. Ante esta problemática, la remediación basada en soluciones naturales —especialmente la fitorremediación mediante especies nativas— ha emergido como una alternativa ambientalmente sostenible, de bajo costo y con altos beneficios ecológicos.

La presente investigación se enmarca en la línea de remediación ambiental y restauración ecológica de suelos contaminados, específicamente en el uso de especies arbóreas nativas para la recuperación de suelos impactados por cadmio. Los antecedentes nacionales e internacionales consultados evidencian avances importantes. Investigaciones como las de Kaur et al. (2017), Jebara et al. (2019) y Pan et al. (2019) han demostrado que diversas especies vegetales son capaces de absorber, estabilizar o inmovilizar Cd en suelos contaminados, incluso cuando se combinan con bacterias promotoras del crecimiento vegetal. En el ámbito peruano, trabajos como los de Romero-Arribasplata y Bravo-Thais (2021), Chang-Kee et al. (2018), Cruzado-Tafur et al. (2021) y Narvaez-Ttito (2024) han evidenciado la capacidad de especies nativas andinas para extraer o estabilizar metales pesados, aunque la mayoría de estudios se concentraron en gramíneas y arbustos, y se desarrollaron en condiciones controladas antes que en escenarios reales de campo.

A partir de estos estudios, se fundamenta la relevancia e impacto de investigar especies arbóreas nativas altoandinas que podrían tener un rol ecológico más robusto en la remediación de suelos contaminados. Entre estas especies, *Polylepis incana* (queñua)

se destaca por su adaptación a condiciones extremas de altitud, su capacidad para formar suelos orgánicos ricos, favorecer la retención de humedad, promover actividad microbiana y contribuir a la estabilización estructural del suelo. Sin embargo, pese a su potencial, no existen estudios que evalúen experimentalmente el papel de *Polylepis incana* en la remediación de suelos impactados por cadmio en condiciones reales de campo, lo que constituye una brecha significativa en la literatura científica y en la gestión ambiental de regiones altoandinas.

En este contexto, la hipótesis de trabajo sostiene que la inserción de *Polylepis incana*, sola o en combinación con bacterias beneficiosas del suelo, genera mejoras significativas en la calidad del suelo y reduce la concentración de cadmio en un periodo de seis meses, en comparación con suelos sin intervención. Esta hipótesis se sustenta en estudios previos que han demostrado efectos positivos de la vegetación nativa y de la actividad bacteriana en la inmovilización y fitoestabilización de metales pesados.

Derivado de esta hipótesis, el objetivo general del estudio es evaluar el efecto de la inserción de *Polylepis incana*, sola y combinada con bacterias, sobre la remediación de suelos impactados con cadmio en la mina Santa Bárbara durante el periodo marzo-agosto de 2025. Para ello, se implementaron estrategias metodológicas rigurosas, como un diseño experimental de campo con cuatro parcelas y un arreglo factorial simple, mediciones repetidas durante seis meses, análisis fisicoquímicos de laboratorio (pH, carbono orgánico, conductividad, CIC, nutrientes, metales), y el empleo de técnicas estadísticas como ANOVA de medidas repetidas y modelos mixtos.

La estructura de la tesis se organiza en cinco capítulos. El Capítulo I, Planteamiento del Problema, presenta la problemática ambiental, los antecedentes relevantes, la identificación de la brecha de conocimiento, la formulación del problema y los objetivos del estudio. El Capítulo II, Marco Teórico, desarrolla los conceptos fundamentales relacionados con la contaminación por metales pesados, las propiedades

del suelo, la fitorremediación, la biorremediación y la importancia ecológica de *Polylepis incana*. El Capítulo III, Metodología, detalla el tipo y nivel de investigación, el diseño experimental, el ámbito temporal y espacial, la población y muestra, las técnicas de recolección y análisis, y los procedimientos experimentales. El Capítulo IV, Resultados, presenta los datos obtenidos en campo y laboratorio, así como su análisis estadístico e interpretación. Finalmente, sobre los resultados, se presentan la discusión y conclusiones, interpreta los hallazgos en relación con la literatura, expone las implicancias ambientales del estudio y formula recomendaciones para la gestión y recuperación de suelos degradados.

Los autores.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción del problema

La contaminación de los suelos por metales pesados, en particular por cadmio (Cd), constituye uno de los problemas ambientales más persistentes y difíciles de gestionar en zonas mineras de alta montaña. En los últimos años, la remediación mediante especies vegetales nativas se ha convertido en una alternativa de creciente interés, debido a su bajo costo, sostenibilidad y adaptabilidad a ecosistemas deteriorados. Sin embargo, a pesar de los avances alcanzados en estudios experimentales y de laboratorio, el conocimiento sobre la capacidad real de especies altoandinas para estabilizar o disminuir la concentración de Cd en suelos degradados continúa siendo limitado, especialmente en condiciones de campo real.

A nivel internacional, investigaciones como las de Kaur et al. (2017) han demostrado que distintas especies arbóreas pueden acumular o estabilizar el cadmio en tejidos y raíces, evidenciando que los árboles multipropósito tienen un potencial significativo para reducir la concentración de Cd en el suelo, dependiendo de su biomasa, tolerancia y eficiencia de absorción. Asimismo, estudios como los de Jebara et al. (2019) y Pan et al. (2019) han mostrado que el uso de especies nativas, incluso combinadas con bacterias promotoras del crecimiento vegetal, mejora la fitoextracción o la

fitoestabilización de metales pesados en terrenos contaminados, reforzando el rol de la flora local como agente de remediación.

En el contexto peruano, los antecedentes también evidencian un potencial importante de la vegetación nativa andina. Por ejemplo, Romero-Arribasplata y Bravo-Thais (2021) demostraron que especies como el ichu y la cortadera pueden retener una variedad de metales pesados, particularmente hierro, cobre y zinc, aunque la acumulación de Cd fue más discreta. Otros trabajos, como el de Chang-Kee et al. (2018), han identificado diversas especies nativas capaces de acumular Cd y otros metales, destacando factores de bioconcentración y translocación que las posicionan como candidatas para procesos de fitoextracción y fitoestabilización. En esa misma línea, Cruzado-Tafur et al. (2021) evidenciaron que ciertas especies peruanas pueden estabilizar o extraer Cd en suelos altamente contaminados, mientras que estudios recientes en Puno (Narvaez-Ttito, 2024) confirman que varias gramíneas y arbustos presentan potencial fitorremediador en ecosistemas altoandinos impactados por pasivos ambientales mineros.

Sin embargo, también existen estudios cuyos resultados no son del todo concluyentes o presentan limitaciones metodológicas. Algunos trabajos muestran que la fitoextracción de Cd es baja en varias especies nativas, o que la capacidad de remoción varía significativamente según el pH, la textura del suelo, la materia orgánica o las condiciones climáticas. En otros casos, como se observa en algunos experimentos nacionales, la presencia de enmiendas orgánicas o condiciones controladas de invernadero no reflejan adecuadamente las condiciones del suelo natural, generando incertidumbre sobre la eficacia de la remediación a escala de campo. Por ello, aunque se ha documentado el potencial de especies altoandinas para absorber o estabilizar metales, todavía existen vacíos sobre su funcionamiento en condiciones reales, especialmente en suelos con alta variabilidad edáfica y climática como los de Huancavelica.

Esta revisión evidencia una brecha importante de conocimiento: no existen estudios que evalúen experimentalmente, de manera continua y en condiciones reales de campo, la eficacia de *Polylepis incana* (queñua) en la remediación de suelos impactados con cadmio, pese a que es una de las especies arbóreas nativas más representativas de los Andes, altamente adaptada a suelos degradados y a condiciones extremas de altitud. Tampoco se cuenta con investigaciones que comparen su efecto aislado con intervenciones combinadas —como la inoculación con bacterias— para identificar si existe un efecto potenciador sobre la reducción de Cd o sobre la mejora de propiedades fisicoquímicas clave como la CIC, el carbono orgánico o el pH.

En este marco, surge la necesidad de generar evidencia científica rigurosa sobre el comportamiento de *Polylepis incana* en la remediación de suelos contaminados con cadmio en la mina Santa Bárbara, una zona históricamente afectada por actividades mineras que han deteriorado la calidad edáfica y generados riesgos ambientales persistentes. El propósito investigativo se orienta a determinar si la incorporación de esta especie nativa, sola o combinada con microorganismos, contribuye significativamente a la reducción del Cd y a la mejora de los parámetros de calidad del suelo a lo largo del tiempo.

Para responder a este problema, la presente investigación implementa un diseño experimental en cuatro parcelas con tratamientos diferenciados —suelo sin intervención, suelo + *Polylepis incana*, suelo + bacterias, y suelo + bacterias + *Polylepis incana*—, con monitoreo mensual durante seis meses. Se evaluaron parámetros clave del suelo (pH, carbono orgánico, CE, CIC, nutrientes, densidad aparente y concentración de Cd), lo que permite obtener un análisis integral de la dinámica del suelo bajo cada tratamiento. Este enfoque metodológico, basado en mediciones repetidas y análisis comparativos, permite llenar la brecha existente y aportar evidencia confiable sobre la capacidad real de *Polylepis incana* como agente de remediación en suelos mineros andinos.

1.2. Formulación del problema

1.2.1. Problema general

¿Cuál es el efecto de la incorporación de *Polylepis incana* (*queñua*) en la remediación de suelos impactados por cadmio en la mina de Santa Bárbara, comparando parcelas con distintas intervenciones durante seis meses (marzo–agosto, 2025)?

1.2.2. Problemas específicos

- a) ¿Las parcelas solo con *queñua* (parcela 2) presentan una reducción de Cd a lo largo de los seis meses comparadas con la parcela 1 (suelo solo)?
- b) ¿Las parcelas solo con inoculación bacteriana (parcela 3) presentan una reducción de Cd a lo largo de los seis meses comparadas con la parcela 1 (suelo solo)?
- c) ¿La presencia de Cd se correlaciona con las propiedades físico-químicas de los suelos a lo largo de los seis meses?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Determinar el efecto de la incorporación de *Polylepis incana* (*queñua*) en la remediación de suelos impactados por cadmio en la mina de Santa Bárbara, comparando parcelas con distintas intervenciones durante seis meses (marzo–agosto, 2025).

1.3.2. Objetivos específicos

- a) Determinar que parcelas solo con *queñua* (parcela 2) presentan una reducción de Cd a lo largo de los seis meses comparadas con la parcela 1 (suelo solo).
- b) Determinar que parcelas solo con inoculación bacteriana (parcela 3) presentan una reducción de Cd a lo largo de los seis meses comparadas con la parcela 1 (suelo solo).
- c) Establecer la relación de Cd con las propiedades físico-químicas de los suelos a lo largo de los seis meses.

1.4. Justificación

1.4.1. Justificación teórica

La investigación es importante porque amplía el conocimiento sobre la remediación de suelos contaminados con cadmio mediante el uso de especies nativas, un campo en el que persisten vacíos importantes, especialmente en relación con especies arbóreas altoandinas. Estudios internacionales han demostrado el potencial de diversas plantas para acumular o estabilizar Cd, como lo evidencian Kaur et al. (2017) con especies arbóreas multipropósito y Jebara et al. (2019) y Pan et al. (2019) al mostrar que la interacción planta–microorganismo puede potenciar los procesos de fitorremediación. En el contexto peruano, investigaciones como las de Romero-Arribasplata y Bravo-Thais (2021), Chang-Kee et al. (2018), Cruzado-Tafur et al. (2021) y Narvaez-Ttito (2024) confirman que diversas especies nativas poseen capacidad de fitoextracción o fitoestabilización de metales pesados; sin embargo, la mayoría se han centrado en gramíneas y arbustos, dejando sin explorar el potencial de especies arbóreas como *Polylepis incana*. Así, este estudio contribuye al marco teórico existente al evaluar por primera vez, en condiciones reales de campo, el papel de esta especie arbórea en la remediación de suelos impactados con cadmio, fortaleciendo los fundamentos científicos

sobre el uso de flora nativa para la restauración ambiental de ecosistemas altoandinos degradados.

1.4.2. Justificación práctico-social

Desde una perspectiva práctico-social, la investigación tiene alta relevancia debido a que se desarrolla en la mina Santa Bárbara, un área históricamente afectada por la actividad minera y que representa un problema ambiental para la región de Huancavelica. Generar evidencia sobre la eficacia de *Polylepis incana* como estrategia de remediación contribuye al diseño de alternativas sostenibles, de bajo costo y culturalmente apropiadas para la rehabilitación de suelos contaminados. Los resultados podrán ser utilizados por comunidades locales, instituciones públicas y organizaciones ambientales para implementar programas de revegetación con especies nativas, reduciendo los riesgos asociados a la toxicidad del Cd y mejorando la calidad ecológica, económica y social del territorio. Así, este estudio se alinea con los principios de gestión ambiental responsable y promueve la recuperación de paisajes altoandinos degradados mediante soluciones basadas en la naturaleza.

1.4.3. Justificación metodológica

Metodológicamente, la investigación se es importante porque emplea un diseño experimental riguroso y mediciones válidas y confiables para evaluar los cambios en la calidad del suelo. La aplicación de un arreglo factorial simple con mediciones repetidas a lo largo de seis meses permite observar tendencias temporales, analizar efectos diferenciados de los tratamientos y fortalecer la validez interna del estudio. Asimismo, la

inclusión de análisis fisicoquímicos estandarizados —como pH, carbono orgánico, nutrientes, conductividad eléctrica, CIC y concentración de Cd— garantiza precisión y comparabilidad con estudios similares. El uso de instrumentos calibrados, protocolos de laboratorio certificados y análisis estadísticos adecuados (ANOVA de medidas repetidas y modelos mixtos) aporta solidez científica a los resultados, asegurando que las conclusiones del estudio estén respaldadas por evidencia metodológicamente robusta.

1.5. Limitaciones

Las principales limitaciones del estudio se relacionan con el carácter temporal del diseño experimental y la necesidad de contar con un mayor número de mediciones longitudinales para evaluar con mayor precisión los procesos de remediación del suelo. Si bien el monitoreo mensual durante seis meses permite identificar tendencias iniciales en la dinámica del cadmio y de las propiedades fisicoquímicas del suelo, este periodo puede ser insuficiente para captar plenamente los cambios ecológicos y edáficos que suelen manifestarse de forma lenta en ecosistemas altoandinos, especialmente cuando se utilizan especies arbóreas como *Polylepis incana*, cuyo establecimiento y efectos sobre el suelo requieren tiempos más prolongados.

Asimismo, la evolución de variables como el carbono orgánico, la capacidad de intercambio catiónico, la densidad aparente o la estabilidad del Cd puede depender de ciclos estacionales completos, lo que implica que mediciones adicionales a lo largo de uno o más años aportarían evidencia más robusta sobre la eficacia real del tratamiento. Finalmente, aunque el diseño experimental permite detectar efectos comparativos entre tratamientos, futuras investigaciones con mediciones extendidas, replicación espacial más amplia y análisis multitemporales permitirán fortalecer la validez externa y generar

conclusiones más sólidas sobre los procesos de remediación en suelos mineros impactados.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

2.1.1. Antecedentes internacionales

Kaur et al. (2017) desarrollaron la investigación titulada: *Fitorremediación de suelos contaminados con cadmio mediante especies arbóreas multipropósito*, cuyo propósito fue evaluar el potencial de fitoextracción de cadmio (Cd) de cuatro especies de árboles multipropósito, a saber, eucalipto (*Eucalyptus tereticornis* Sm.), subabul [*Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit], dhrek (*Melia azedarach* L.) y shisham (*Dalbergia sissoo* Roxb.) a seis dosis de Cd aplicadas en forma de solución a través de $\text{CdCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (0, 10, 20, 40, 80 y 120 mg Cd kg^{-1} de suelo) y cosechadas después de 18 meses de crecimiento en un suelo franco arenoso alcalino en macetas de barro. Se determinaron la materia seca (MS) de hojas, tallos y raíces, el contenido de Cd de estos constituyentes y el del suelo antes de plantar y después de cosechar las especies arbóreas. Subabul tuvo la mayor producción total de MS y el eucalipto la menor en todos los niveles de Cd. La MS total no disminuyó significativamente hasta la aplicación de 40 mg Cd kg^{-1} de suelo ($P > 0,05$). El nivel más alto de Cd resultó en una reducción del 49, 41, 26 y 43%

en la MS total de eucalipto, *subabul*, *dhrek* y *shisham*, respectivamente, sobre el control. La concentración de cadmio fue mayor en las hojas, mientras que la absorción fue mayor en los tallos que los otros componentes. *Subabul* tuvo una absorción significativamente mayor (0,05–71,4 mg pot⁻¹) de Cd en varios niveles debido a su mayor biomasa, mientras que *shisham* tuvo la menor (0,05–28,2 mg pot⁻¹) ($P \leq 0,05$). El Cd disponible en el suelo tras la cosecha de las plantas fue el más bajo en el *subabul* y el más alto en las macetas *shisham*. El nivel crítico superior de Cd disponible en el suelo, con una reducción del 20 % de la MS, fue el más alto para el *dhrek* (85 mg kg⁻¹) y el más bajo para el eucalipto (46 mg kg⁻¹). Por lo tanto, el *dhrek* fue más tolerante al Cd, pero el *subabul* presentó el mayor potencial de *fitoextracción* de Cd del suelo.

Jebara et al. (2019) desarrollaron la investigación titulada: *Fitorremediación de suelos contaminados con cadmio mediante el uso de leguminosas inoculadas con bacterias promotoras del crecimiento vegetal eficientes y resistentes al cadmio*, cuyo propósito fue analizar que las leguminosas *coinoculadas* con PGPB resistente a Cd podrían ser útiles en la fitorremediación de suelos contaminados y la *biofertilización*. Las leguminosas *coinoculadas* por bacterias promotoras del crecimiento vegetal resistentes al cadmio (PGPB) contribuyen a un tipo de fitorremediación para aliviar la contaminación por Cd en el suelo. Las PGPB participan en el crecimiento vegetal mediante la producción de fitohormonas y sideróforos, además de la fijación simbiótica de nitrógeno y la capacidad de solubilidad del fósforo. Se ha informado que las simbiosis leguminosas-PGPB influyen en la biodisponibilidad de Cd en leguminosas mediante diversos mecanismos, como la bioacumulación, la precipitación, la *complejación* y la quelación. La toxicidad del Cd ha inducido una amplia gama de mecanismos de tolerancia fisiológicos y bioquímicos en leguminosas, como la expresión génica de proteínas de unión a metales implicadas en la quelación y el transporte de Cd, como la *fitoquelatina* sintasa (PCS) y la *metalotionina* (MT), y la activación del sistema de defensa antioxidante. En este capítulo, demostramos que las leguminosas *coinoculadas* con PGPB resistente a

Cd podrían ser útiles en la fitorremediación de suelos contaminados con Cd y en la biofertilización.

Pan et al. (2019) desarrollaron la investigación titulada: *Potencial de las especies de plantas autóctonas para la fitorremediación de suelos contaminados con metales (loides) en el área minera de Baoshan*, China, cuyo propósito fue investigar la concentración de metal(oides) en suelos y plantas nativas en el área minera de Baoshan para su posible aplicación en fitorremediación. Las concentraciones totales de arsénico (As), cadmio (Cd), plomo (Pb) y zinc (Zn) en el suelo variaron de 125 a 6656, 5,10 a 1061, 568 a 49294 y 241 a 17296 mg kg⁻¹, respectivamente, lo que muestra una contaminación severa. Entre 20 especies nativas de esta área, *Pteris ensiformis* acumuló 1091 mg kg⁻¹ de As en el brote, y su factor de translocación (FT) fue mayor que 1, lo que sugiere una capacidad potencial para la fitoextracción de As. *Boehmeria nivea*, *Aster prorerus* e *Hydrocotyle sibthorpioides* mostraron potencial para la fitoextracción de Cd debido a su alta acumulación de Cd en brotes (490,3, 175,4 y 128,5 mg kg⁻¹, respectivamente) y altos TFs (92,0, 22,1 y 6,7, respectivamente). Se encontró que *Eleusine indica* y *P. ensiformis* contenían altas concentraciones de Pb (7474 mg kg⁻¹) y Zn (1662 mg kg⁻¹) en raíces, pero con bajos TFs para Pb (0,4) y Zn (0,2), lo que sugiere una capacidad potencial para la fitoestabilización. Hubo una correlación positiva ($p < 0,01$, $N = 25$) de TFs entre los metal(oides), lo que indica una interacción sinérgica en la absorción de metal(oides) por estas plantas. Según las concentraciones de metal(oides) en los brotes, los factores de bioconcentración (BF) y los TF, así como las características botánicas como la amplia presencia, el alto rendimiento de biomasa y el rápido crecimiento de las plantas, las cinco especies nativas identificadas anteriormente tienen potencial para la fitorremediación en el área minera de Baoshan.

2.1.2. Antecedentes nacionales

Romero-Arribasplata y Bravo-Thais (2021) desarrollaron la investigación titulada: *Estudio del potencial de acumulación de metales pesados de plantas nativas peruanas para la fitorremediación de pasivos mineros*, cuyo propósito fue evaluar la capacidad de especies nativas, como el ichu y la cortadera, para absorber metales pesados presentes en los pasivos ambientales mineros (PAM). Para ello, recolectaron muestras tanto de las plantas como de los suelos provenientes de zonas específicas de la provincia de Hualgayoc, en Cajamarca. Con este material, elaboraron celdas a escala de laboratorio donde se sembraron las especies sobre los suelos extraídos. Tras un periodo de ocho meses, se retiraron las plantas y se analizaron las concentraciones finales de metales pesados tanto en las raíces como en las partes aéreas. Los resultados evidenciaron que las especies evaluadas presentan diferentes niveles de acumulación, siendo el hierro (Fe) el metal con mayor absorción, seguido por el cobre (Cu) y el zinc (Zn), mientras que el cadmio (Cd), el plomo (Pb) y el cromo (Cr) se absorbieron en menores proporciones. Asimismo, se observó que la eficiencia de remoción aumenta en suelos con pH inferior a 7, aunque la absorción en las partes aéreas disminuye bajo estas condiciones. En conjunto, los hallazgos indican que las plantas nativas estudiadas son adecuadas para continuar investigaciones y avanzar hacia procesos de fitorremediación de PAM a mayor escala.

Chang-Kee et al. (2018) desarrollaron la investigación titulada: *Acumulación de metales pesados en plantas nativas andinas: herramientas potenciales para la fitorremediación de suelos en Ancash (Perú)*, cuyo propósito fue caracterizar nueve especies de plantas nativas, previamente identificadas como potenciales hiperacumuladoras, de áreas impactadas por relaves mineros en la región Ancash. Las plantas se cultivaron en suelos mineros bajo condiciones de invernadero durante 5 meses, después de lo cual se analizó la concentración de Cd, Cu, Ni, Pb y Zn en raíces, brotes y suelos. Se calcularon la bioacumulación (BAF) y el factor de translocación (FT) para determinar la cantidad de cada metal acumulado en las raíces y brotes, e identificar qué

especies podrían ser más adecuadas para la fitorremediación. Las muestras de suelo presentaron concentraciones elevadas de Cd (6,50–49,80 mg/kg), Cu (159,50–1187,00 mg/kg), Ni (3,50–8,70 mg/kg), Pb (1707,00–4243,00 mg/kg) y Zn (909,00–7100,00 mg/kg), que superaron los estándares nacionales de calidad ambiental. Después de la exposición a relaves mineros, las concentraciones de metales en los brotes fueron más altas en *Werneria nubigena* (Cd, 16,68 mg/kg; Cu, 41,36 mg/kg; Ni, 26,85 mg/kg; Zn, 1691,03 mg/kg), *Pennisetum clandestinum* (Pb, 236,86 mg/kg) y *Medicago lupulina* (Zn, 1078,10 mg/kg). Las concentraciones de metales en las raíces fueron más altas en *Juncus bufonius* (Cd, 34,34 mg/kg; Cu, 251,07 mg/kg; Ni, 6,60 mg/kg; Pb, 718,44 mg/kg) y *M. lupulina* (Zn, 2415,73 mg/kg). El mayor BAF se calculó para *W. nubigena* (Cd, 1,92; Cu, 1,20; Ni, 6,50; Zn, 3,50) y *J. bufonius* (Ni, 3,02; Zn, 1,30); BCF para *Calamagrostis recta* (Cd, 1,09; Cu, 1,80; Ni, 1,09), *J. bufonius* (Cd, 3,91; Cu, 1,79; Ni, 18,36) y *Achyrocline alata* (Ni, 137; Zn, 1,85); y TF para *W. nubigena* (Cd, 2,36; Cu, 1,70; Ni, 2,42; Pb, 1,17; Zn, 1,43), *A. alata* (Cd, 1,14; Pb, 1,94), *J. bufonius* (Ni, 2,72; Zn, 1,63) y *P. clandestinum* (Zn, 1,14). Nuestros resultados sugieren que estas especies vegetales tienen un gran potencial para la fitorremediación del suelo, dada su capacidad para acumular y transferir metales y su tolerancia a ambientes altamente contaminados por metales en la región andina.

Cruzado-Tafur et al. (2021) desarrollaron la investigación titulada: *Acumulación de As, Ag, Cd, Cu, Pb y Zn por plantas nativas que crecen en suelos contaminados por pasivos ambientales mineros en los Andes peruanos*, cuyo propósito fue evaluar la capacidad de las especies de plantas nativas cultivadas en suelos contaminados post-minería para acumular metales en vista de su posible idoneidad para la fitorremediación. Las áreas de estudio incluyeron dos pasivos ambientales en la región de Cajamarca en los Andes peruanos. Se determinó el contenido de As, Ag, Cd, Cu, Pb y Zn en órganos individuales de las plantas y se correlacionó con las características del suelo. El grado de contaminación dependió del metal con resultados que variaron desde suelos no contaminados (Cd) a moderadamente (Zn), fuertemente (As, Cu) y extremadamente

contaminados (Pb, Ag). Los metales estuvieron presentes principalmente en las fracciones con movilidad limitada de metales. Se determinó la bioacumulación de los metales en las plantas, así como la translocación a los órganos superficiales. De las 21 plantas evaluadas, *Pernettya prostrata* y *Gaultheria glomerata* fueron adecuadas para la fitoestabilización con Zn, y *Gaultheria glomerata* y *Festuca sp.* para Cd. Las especies nativas aplicables para la fitorremediación de Cd fueron *Ageratina glechonophylla* y *Bejaria sp.*, mientras que *Pernettya prostrata* (*Achyrocline alata*), *Ageratina fastigiata*, *Baccharis alnifolia*, *Calceolaria tetragona*, *Arenaria digyna*, *Hypericum laricifolium*, *Brachyotum radula* y *Nicotiana thyrsoiflora* resultaron adecuadas tanto para Cd como para Zn. Ninguna de las plantas estudiadas resultó adecuada para la fitorremediación de Pb, Cu, As y Ag.

Narvaez-Ttito (2024) desarrolló la tesis titulada: *Especies vegetales altoandinas con potencial fitorremedidor para suelos contaminados por metales pesados del pasivo ambiental minero de Palca, Puno*, cuyo propósito fue identificar las especies vegetales con mayor potencial fitorremedidor presentes en el pasivo ambiental minero de Palca, ubicado en el distrito de Palca, provincia de Lampa. A partir del método de transección al paso, se registraron 23 especies altoandinas en tres parcelas y se analizaron, mediante ICP/OES, las concentraciones de metales pesados tanto en las plantas como en el suelo. Además, se calcularon los factores de bioconcentración y traslocación para determinar si las especies cumplían funciones de fitoestabilización o fitoextracción. Los resultados mostraron que *Calamagrostis rigescens* presentó las mayores acumulaciones de Fe, Al, Zn, Pb y Mo; *Disticha muscoides* concentró Mg, Sr y Cu; *Festuca rigescens* acumuló Cr, As y Ni; y *Stipa hans meyeri* absorbió Cd y Al. Asimismo, los análisis de translocación y bioacumulación indicaron que *Stipa hans meyeri* y *Calamagrostis recta* actúan como fitoestabilizadoras de Se, Ag, Al, Co, Mo y V, mientras que *Festuca rigescens* y *Calamagrostis rigescens* muestran capacidad de estabilización para Ti y Cd. En síntesis, las especies altoandinas evaluadas presentan un alto potencial para la fitorremediación de suelos contaminados por pasivos mineros, debido a su adaptación a las condiciones climáticas propias de zonas de altura.

Virú-Vasquez et al. (2025) desarrollaron la investigación titulada: *Integrated Biochar–Compost Amendment for Zea mays L. Phytoremediation in Soils Contaminated with Mining Tailings of Quiulacocha, Peru*, cuyo propósito fue analizar la fitorremediación de suelos contaminados con relaves mineros en Quiulacocha, Perú, utilizando maíz (*Zea mays L.*) como especie remediadora y aplicando enmiendas de biocarbón y compost. Se desarrolló un diseño factorial que consideró dos niveles de relaves (30% y 60% p/p) y dos temperaturas de pirólisis del biocarbón (300 °C y 500 °C). Los relaves presentaban altas concentraciones de metales pesados y condiciones fisicoquímicas pobres, mientras que el biocarbón —producido a partir de residuos de pino— y el compost —procedente de residuos urbanos— aportaron mejoras sustanciales al suelo. En ensayos en macetas se evaluaron los factores de bioconcentración y translocación para determinar la inmovilización de metales y su movimiento dentro de la planta. Los resultados mostraron que la combinación de biocarbón y compost incrementó el pH, la capacidad de intercambio catiónico y la disponibilidad de nutrientes, además de disminuir la biodisponibilidad de metales y restringir su traslado hacia los tejidos aéreos del maíz. El análisis estadístico confirmó que tanto la proporción de relaves como la temperatura del biocarbón influyeron en la eficiencia del proceso. En síntesis, la aplicación conjunta de biocarbón y compost constituye una alternativa sostenible y efectiva para rehabilitar suelos contaminados con relaves, estabilizando los metales y favoreciendo el crecimiento seguro de *Zea mays L.*

2.1.3. Antecedentes locales

Acharte et al. (2023) desarrollaron la investigación titulada: *Eficiencia de bioadsorción de vegetales silvestres sometidos a metales y metaloides contenidos en agua superficial*, cuyo propósito fue determinar y evaluar la eficiencia de bioadsorción de vegetales silvestres en la eliminación de metales y metaloides presentes en agua

superficial provenientes de cabeceras de cuencas del centro poblado de San Pedro de Mimoso Ccochaccasa en la provincia de Angaraes, Huancavelica - Perú. Esto implica utilizar plantas silvestres como agentes de absorción para reducir la concentración de contaminantes en el agua, en este caso, metales y metaloides provenientes de la actividad minera. El estudio se llevó a cabo de manera experimental, prospectiva, transversal y analítica, lo que corresponde al nivel de investigación aplicada. El muestreo se realizó de manera intencional a criterio de los investigadores. La eficiencia de adsorción para la planta chilca fue 16.28% de As, 28.60% de Cd y 27.31% de Pb, para diente de león 28.70% de As, 79.33% de Cd y 28.75% de Pb y cáscara de atún 48.39% en As, 46.38% de Cd y 45.23% de Pb. El resultado es significativo, diente de león con 45,59% supera a cáscara de atún en 39,44% y chilca en 33,44%. Se llevó a cabo un análisis estadístico con el método Tukey y se determinaron que no existe una diferencia significativa en las eficiencias de bioadsorción entre las plantas. Los resultados podrían ser aprovechados para diseñar sistemas de tratamiento de aguas basados en la bioadsorción utilizando estas plantas, ofreciendo una alternativa sostenible y económica a los métodos convencionales de remoción de contaminantes.

Rivera-Peña et al. (2024) desarrollaron la investigación titulada *Biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos y metales pesados, Huancavelica*, cuyo propósito fue analizar la eficacia de especies vegetales y enmiendas orgánicas en la biorremediación de suelos contaminados con metales pesados e hidrocarburos, empleando girasol (*Helianthus annuus L*) y trigo (*Triticum aestivum L*), así como estiércol de cuyes y aserrín. El experimento se realizó en 15 macetas con 10 kg de suelo cada una y una proporción 2:1 entre tierra y enmienda, bajo un diseño completamente aleatorio con arreglo factorial 2×2 , conformando seis tratamientos con tres réplicas cada uno, durante un periodo de seis meses. Los resultados mostraron ligeros incrementos en el pH, la materia orgánica y la conductividad eléctrica debido a la incorporación de enmiendas y exudados radiculares. En cuanto a la remoción de hidrocarburos totales del petróleo (TPH), el tratamiento con trigo y estiércol de cuy logró la mayor reducción (26%). En la

eliminación de metales pesados, las plantas sin enmiendas registraron las mayores eficiencias, alcanzando reducciones de 77% para Cd, 33,3% para Cu, 85,9% para Pb y 87,9% para Zn. En conjunto, el estudio evidencia que las especies vegetales tienen un impacto más significativo en la remoción de metales, mientras que las enmiendas orgánicas resultan más efectivas para disminuir hidrocarburos y mejorar las propiedades físicas del suelo, destacando la importancia de estrategias diferenciadas o combinadas según el tipo de contaminante predominante.

Meza-Quispe y Molina-Llanco (2023) desarrollaron la tesis titulada: *Efecto de la capacidad fitorremediadora de la papa (Solanum ajanhuiri) en el porcentaje de remoción de mercurio y plomo*, cuyo propósito fue evaluar el efecto de la capacidad fitorremediadora de la papa (*Solanum ajanhuiri*) sobre el porcentaje de remoción de mercurio y plomo en suelos contaminados. Metodológicamente, se desarrolló un estudio aplicado y de nivel explicativo, empleando esta especie como agente fitorremediador para disminuir la concentración de dichos metales. Se realizaron ensayos experimentales para determinar el porcentaje de remoción y se analizaron condiciones edáficas como pH, textura, conductividad eléctrica y materia orgánica, que influyen en la absorción de mercurio y plomo por la planta. Antes del tratamiento, las concentraciones de mercurio (78.65 mg/kg) y plomo (642.51 mg/kg) eran elevadas; sin embargo, tras la aplicación del cultivo de papa, estas disminuyeron a 37.40 mg/kg y 275.89 mg/kg, respectivamente, logrando una remoción promedio del 52.46% para mercurio y del 57.06% para plomo. Los hallazgos evidencian que la papa posee un considerable potencial fitorremediador, constituyéndose en una alternativa eficaz para la descontaminación de suelos afectados por metales pesados y en una herramienta valiosa para la recuperación ambiental de zonas degradadas.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Contaminación de suelos por metales pesados

2.2.1.1. Concepto de metales pesados

Los metales pesados se definen como un grupo de elementos químicos metálicos o metaloides con alto peso molecular, densidad superior a 5 g/cm³ y número atómico mayor a 20, caracterizados por propiedades como ductibilidad, conductividad y estabilidad como cationes, incluyendo elementos como cadmio (Cd), plomo (Pb), mercurio (Hg), cromo (Cr), níquel (Ni), cobre (Cu) y zinc (Zn) (Beltrán & Gómez, 2015). Según una revisión científica hecha por Michael (2023), estos metales se clasifican en esenciales (requeridos en trazas para funciones biológicas, como Cu, Zn, Ni), no esenciales tóxicos (como Cd, Pb, Hg) y metaloides tóxicos (como As), destacando su persistencia ambiental y bioacumulación en cadenas tróficas. Fuentes como Pan et al. (2019), citados en revistas indexadas, enfatizan que su toxicidad surge de la sustitución de cationes esenciales en enzimas y la generación de especies reactivas de oxígeno.

No obstante, es crucial precisar que, en el contexto de la remediación de suelos, el foco no está en la densidad, sino en su potencial tóxico, movilidad y capacidad de bioacumulación. Elementos como el cadmio (Cd), plomo (Pb), arsénico (As), mercurio (Hg) y cromo (Cr) son paradigmáticos en este grupo debido a su alta toxicidad incluso en trazas (Kabata-Pendias, 2010).

Para Babu et al. (2021), en el ecosistema suelo, estos metales pueden presentarse en diversas especies químicas (formas iónicas libres, complejadas con materia orgánica, adsorbidas en óxidos, o como precipitados), lo cual determina directamente su biodisponibilidad y, por ende, su riesgo ecotoxicológico. Es fundamental diferenciar entre el contenido total (que mide la carga contaminante total) y la fracción biodisponible (la

fracción accesible para la absorción por raíces), siendo esta última la que determina el impacto inmediato sobre la biota edáfica y la cadena trófica.

2.2.1.2. Origen de la contaminación por Cd en zonas mineras

El cadmio (Cd) es un metal pesado tóxico que, a diferencia de otros elementos como el cobre o el zinc, raramente es el producto principal de una operación minera. Su presencia en suelos de zonas mineras se debe fundamentalmente a su asociación geoquímica natural con minerales de zinc, plomo y cobre, y a su posterior liberación y movilización mediante procesos naturales y antrópicos durante las actividades de exploración, explotación y procesamiento de minerales (Kabata-Pendias, 2010). Esta liberación transforma al Cd desde una forma mineralógica estable y poco biodisponible en el yacimiento, a formas iónicas solubles y altamente tóxicas en el medio ambiente.

La fuente primaria del Cd en zonas mineras es geológica. El Cd se encuentra en la corteza terrestre con una concentración promedio de 0.1-0.2 mg/kg, pero este valor se enriquece significativamente en ciertos tipos de depósitos minerales (Alloway, 2013):

- En Depósitos de Sulfuros Masivos Volcanogénicos (VMS) y Tipo Pórfido Cuprífero: Común en los Andes, el Cd se presenta como impureza en la esfalerita (ZnS). La esfalerita es el principal mineral hospedante de Cd, donde el catión Zn^{2+} es sustituido isomórficamente por Cd^{2+} en la red cristalina, alcanzando concentraciones de hasta 5% en peso (H. A. Smith, 1984).
- En Vetas Hidrotermales de Pb-Zn-Ag: Típicas de la mineralización andina, el Cd también se encuentra en la galena (PbS) y en minerales secundarios como la smithsonita ($ZnCO_3$). Durante los procesos hidrotermales que formaron estos yacimientos, el Cd, por su similitud iónica con el Zn, fue coprecipitado y concentrado.

La transición del Cd desde un componente estable de la mena a un contaminante móvil en el suelo y el agua ocurre a través de una serie de procesos interconectados: procesos naturales acelerados por la minería y procesos antrópicos directos.

Meteorización y Oxidación de Sulfuros: El proceso fundamental es la oxidación de minerales sulfurados (como la pirita - FeS_2 , esfalerita - ZnS) expuestos al oxígeno y agua. Esta oxidación, catalizada por bacterias quimiolitotróficas como *Acidithiobacillus ferrooxidans*, genera Drenaje Ácido de Roca (DAR). Las reacciones simplificadas son:

- Oxidación de pirita: $2\text{FeS}_2 + 7\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{Fe}^{2+} + 4\text{SO}_4^{2-} + 4\text{H}^+$
- Acidificación del medio: $\text{Fe}^{2+} + \frac{1}{4}\text{O}_2 + \text{H}^+ \rightarrow \text{Fe}^{3+} + \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$
- Ataque a la esfalerita por Fe^{3+} : $\text{ZnS (Cd)} + 8\text{Fe}^{3+} + 4\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Zn}^{2+} (\text{Cd}^{2+}) + 8\text{Fe}^{2+} + \text{SO}_4^{2-} + 8\text{H}^+$

El resultado es la liberación de Cd^{2+} soluble y la acidificación continua del medio, que a su vez mantiene al Cd en solución e incrementa su movilidad (Nordstrom & Alpers, 1999).

Una vez liberado, el destino del Cd en el suelo depende de sus propiedades edáficas (Alloway, 2013):

- pH: Es el factor más crítico. A pH bajo (<5.5), el Cd^{2+} permanece soluble y móvil. A pH neutro-alcalino, precipita como carbonatos/hidróxidos o se adsorbe fuertemente a coloides.
- Materia Orgánica (MO): Los grupos funcionales (carboxílicos, fenólicos) de la MO forman complejos orgánicos con Cd, que pueden reducir o, en algunos casos, aumentar su movilidad.
- Textura y Minerales Arcillosos: Las arcillas (especialmente las de carga negativa) y los óxidos de Fe, Mn y Al adsorben Cd, fijándolo temporalmente.

- Potencial Redox (Eh): En condiciones anóxicas (suelos inundados), la formación de sulfuros insolubles (CdS) puede inmovilizar el Cd.

De este modo, la contaminación por Cd en zonas mineras es el resultado de una cascada de procesos que se inicia en la asociación geoquímica natural del Cd con minerales de Zn-Pb, continúa con su liberación masiva durante las actividades mineras (principalmente por oxidación de sulfuros y generación de polvo), y culmina con su acumulación en la matriz del suelo, donde su destino final y toxicidad son modulados por las propiedades físico-químicas del suelo. Entender este origen y estos mecanismos es el primer paso fundamental para diseñar estrategias de remediación efectivas, como la fitoestabilización o fitoextracción.

2.2.1.3. Propiedades fisicoquímicas del cadmio (Cd)

El cadmio (Cd), elemento número 48 de la tabla periódica, es un metal blando, dúctil y de color blanco azulado, con un punto de fusión relativamente bajo (321 °C) y una densidad elevada (8.65 g/cm³). Desde la perspectiva ambiental, su alta movilidad en medios acuosos y edáficos es una de sus propiedades más críticas. Esta movilidad está fuertemente controlada por el pH y el potencial redox (Eh) del medio. En condiciones oxidantes y ácidas (pH < 6), predomina el ion libre divalente Cd²⁺, que es la forma más soluble, biodisponible y tóxica. En condiciones alcalinas (pH > 7.5) o reductoras, el cadmio puede precipitar como carbonatos (CdCO₃), hidróxidos (Cd(OH)₂) o sulfuros insolubles (CdS), lo que reduce drásticamente su biodisponibilidad (Alloway, 2013; Kabata-Pendias, 2010).

Químicamente, el Cd presenta una afinidad notable por los grupos tiol (-SH) de las proteínas y enzimas, mecanismo base de su elevada toxicidad biológica. En el suelo, su comportamiento está determinado por su fuerte tendencia a formar complejos con la materia orgánica (especialmente con ácidos húmicos y fúlvicos) y a adsorberse en superficies de óxidos de hierro, manganeso y aluminio, y en arcillas. No obstante, estos procesos de retención son reversibles y dependientes del pH. El ion Cd^{2+} posee un radio iónico similar al del Ca^{2+} y Zn^{2+} , lo que le permite competir y suplantar a estos nutrientes esenciales en los sitios de absorción de las raíces vegetales y en los procesos fisiológicos, generando desnutrición y disrupción metabólica en los organismos (H. A. Smith, 1984). Su potencial de bioacumulación a lo largo de las cadenas tróficas es extremadamente alto, ya que los organismos lo absorben eficientemente, pero carecen de mecanismos eficaces para excretarlo.

2.2.2. Suelo como sistema físico-químico y biológico

2.2.2.1. Concepto y funciones del suelo

El suelo es un cuerpo natural, dinámico y multifuncional que cubre la superficie terrestre, resultante de la interacción a largo plazo entre factores formadores como el clima, los organismos, la roca madre, el relieve y el tiempo. No es un sustrato inerte, sino un sistema trifásico complejo compuesto por una fase sólida (minerales y materia orgánica), una fase líquida (agua y soluciones del suelo) y una fase gaseosa (atmósfera del suelo), que alberga una inmensa diversidad biológica (Brady & Weil, 2008). Esta concepción ecosistémica del suelo subraya su papel como un recurso no renovable a escala humana, cuya formación puede tardar miles de años, pero cuya degradación puede ser extremadamente rápida.

Para Brady y Weil, las funciones del suelo son esenciales para el sostenimiento de la vida en la Tierra y pueden clasificarse en tres ámbitos principales: productivas, ambientales y de soporte. La función productiva o agronómica es la más reconocida, ya que el suelo es el fundamento para la producción de biomasa, proporcionando anclaje, agua, aire y nutrientes a las plantas, y constituyendo así la base de la seguridad alimentaria. Sin embargo, sus funciones ambientales son igualmente cruciales: actúa como un filtro, amortiguador y transformador de sustancias, purificando el agua que percola y atenuando contaminantes; regula los ciclos biogeoquímicos (como el del carbono, nitrógeno y fósforo); y es un importante reservorio de carbono, mitigando el cambio climático

Además, el suelo cumple funciones de soporte para la biodiversidad y la actividad humana. Sirve como hábitat y banco de genes para una cuarta parte de la biodiversidad del planeta, desde microorganismos hasta fauna edáfica, que son los ingenieros de los procesos de formación y fertilidad del suelo. También funciona como plataforma física para las estructuras humanas y el desarrollo urbano. Por último, el suelo tiene una función cultural e histórica, ya que preserva paleontológico y arqueológico, constituyendo un registro de las condiciones ambientales y las actividades humanas del pasado. La degradación del suelo, por tanto, no solo compromete la producción de alimentos, sino que erosiona la resiliencia de los ecosistemas y la provisión de servicios ecosistémicos vitales.

2.2.2.2. Calidad del suelo y degradación

La calidad del suelo es la capacidad continua de un suelo para funcionar como un sistema vivo vital dentro de los límites de un ecosistema, para sostener la productividad biológica, promover la salud de plantas, animales y humanos, y mantener o mejorar la calidad del aire y el agua (Karlen et al., 1997). Para estos investigadores, este concepto

integral trasciende la visión meramente productiva y evalúa el suelo como un organismo dinámico cuyas funciones clave —como el ciclado de nutrientes, la filtración de agua, la degradación de contaminantes y el hábitat para la biota— dependen de sus propiedades intrínsecas. Por tanto, la calidad se mide mediante indicadores que abarcan las tres esferas del suelo: física (estructura, textura, densidad aparente), química (pH, capacidad de intercambio catiónico, contenido de materia orgánica, disponibilidad de nutrientes) y, de manera crucial, biológica (biomasa microbiana, actividad enzimática, biodiversidad de la fauna edáfica). Un suelo de alta calidad es resiliente, capaz de recuperarse de perturbaciones y mantener sus funciones ecosistémicas a largo plazo.

Según Doran y Zeiss (2000) la degradación del suelo, por su parte, es el proceso que conduce a la disminución irreversible o a la pérdida de su calidad y funciones, siendo la contaminación química uno de sus factores más severos. La degradación puede ser física (erosión, compactación, sellado), química (salinización, acidificación, contaminación por metales pesados y sustancias tóxicas) y biológica (pérdida de materia orgánica y diversidad biológica). Asimismo, Doran y Zeiss afirman que la contaminación por metales pesados como el cadmio (Cd) representa una amenaza insidiosa, ya que altera profundamente la calidad edáfica: 1) Biológicamente, inhibe la actividad enzimática, reduce la diversidad microbiana y elimina a la fauna sensible, colapsando los procesos biogénicos del suelo. 2) Químicamente, desplaza nutrientes esenciales de los sitios de intercambio, reduce el pH a través de procesos de hidrólisis y satura la capacidad amortiguadora del suelo. 3) Físicamente, la pérdida de agregación estabilizada biológicamente puede inducir mayor susceptibilidad a la erosión. Esta degradación químico-biológica convierte al suelo en un medio hostil y disfuncional.

2.2.2.3. Propiedades físico-químicas del suelo relevantes para la remediación

Las propiedades físico-químicas del suelo desempeñan un papel determinante en la movilidad, biodisponibilidad y retención de metales pesados como el cadmio (Cd), influyendo directamente en la eficacia de los procesos de remediación. Entre las propiedades más relevantes se encuentran el pH, la capacidad de intercambio catiónico (CIC), la textura, el contenido de materia orgánica y la conductividad eléctrica. El pH del suelo es considerado uno de los factores más críticos, ya que en condiciones ácidas aumenta la solubilidad y movilidad del cadmio, incrementando su biodisponibilidad y toxicidad para las plantas y microorganismos del suelo (Alloway, 2013). En contraste, suelos con pH neutro a ligeramente alcalino tienden a inmovilizar el cadmio mediante procesos de adsorción y precipitación, reduciendo su disponibilidad. Asimismo, la CIC refleja la capacidad del suelo para retener cationes metálicos en los coloides minerales y orgánicos, siendo mayor en suelos con alto contenido de arcillas finas y materia orgánica (Brady & Weil, 2008).

Por otro lado, la materia orgánica del suelo cumple una función clave en la remediación, debido a su capacidad para formar complejos estables con metales pesados, disminuyendo su movilidad y facilitando procesos de fitoestabilización y fitorremediación. La textura del suelo, determinada por las proporciones de arena, limo y arcilla, condiciona la retención de agua, la aireación y la disponibilidad de nutrientes, factores que influyen en el desarrollo radicular de especies vegetales remediadoras (FAO, 2018). Suelos franco-arcillosos, por ejemplo, presentan mayor capacidad de adsorción de cadmio que suelos arenosos, los cuales favorecen la lixiviación del metal hacia capas más profundas. En conjunto, la comprensión integral de estas propiedades físico-químicas resulta esencial para diseñar estrategias de remediación adecuadas en suelos impactados por actividades mineras, permitiendo optimizar el establecimiento y la eficiencia de especies vegetales nativas en la recuperación ambiental (Rodríguez-Eugenio et al., 2018).

Las propiedades edáficas de los suelos se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 1
Propiedades físico químicas de los suelos

Propiedad	Descripción
pH del suelo	Es una medida de la acidez o alcalinidad del suelo, que indica la concentración de iones hidrógeno (H^+) en la solución del suelo. El pH regula la solubilidad, movilidad y biodisponibilidad de nutrientes y metales pesados como el cadmio.
Carbono orgánico del suelo	Corresponde a la fracción de carbono presente en la materia orgánica del suelo. Influye en la estructura, fertilidad y capacidad del suelo para retener y complejizar metales pesados, reduciendo su biodisponibilidad.
Conductividad eléctrica (CE)	Es un indicador de la concentración de sales solubles en el suelo. Permite evaluar el nivel de salinidad, la cual puede afectar la absorción de nutrientes y la movilidad de metales en el suelo.
Capacidad de intercambio catiónico (CIC)	Es la capacidad del suelo para retener e intercambiar cationes (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ y metales pesados) en las superficies de arcillas y materia orgánica. Una CIC elevada favorece la retención de metales y nutrientes.
Textura del suelo	Se refiere a la proporción relativa de arena, limo y arcilla. Determina la retención de agua, la aireación, la permeabilidad y la capacidad del suelo para adsorber metales pesados.
Densidad aparente del suelo	Es la relación entre la masa del suelo seco y su volumen total, incluyendo los poros. Indica el grado de compactación del suelo y condiciona el crecimiento radicular y la circulación de agua y aire.
Nitrógeno (N)	Es un macronutriente esencial para el crecimiento vegetal, fundamental en la síntesis de proteínas y clorofila. Su disponibilidad influye en el desarrollo de la biomasa vegetal utilizada en procesos de remediación.
Fósforo (P)	Es un nutriente clave en los procesos energéticos de las plantas y en el desarrollo radicular. Puede interactuar químicamente con metales pesados, influyendo en su inmovilización en el suelo.
Potasio (K)	Es un macronutriente que regula el equilibrio hídrico y la activación enzimática de las plantas. Contribuye a la tolerancia vegetal frente a condiciones de estrés, incluido el estrés por metales.
Sodio (Na)	Es un catión presente en suelos salinos o sódicos que, en exceso, puede afectar la estructura del suelo y la absorción de otros nutrientes, influyendo indirectamente en la movilidad de metales.
Magnesio (Mg)	Es un nutriente esencial, componente central de la molécula de clorofila. Participa en procesos fisiológicos de la planta y en el equilibrio catiónico del suelo.
Cadmio (Cd)	Es un metal pesado tóxico presente en el suelo de forma natural o por actividades antrópicas, como la minería. Su movilidad y biodisponibilidad dependen de las propiedades físico-químicas del suelo.

Nota. Adecuado de Brady y Weil (2008).

2.2.2.4. Relación entre las propiedades del suelo y la movilidad del Cd

La movilidad del cadmio (Cd) en el suelo está estrechamente condicionada por sus propiedades físico-químicas, las cuales regulan los procesos de disolución, adsorción, precipitación y complejación del metal. Entre estas propiedades, el pH del suelo es considerado el factor más influyente, debido a que controla la forma química y la solubilidad del cadmio. En suelos ácidos, el Cd se encuentra predominantemente en formas iónicas solubles, lo que incrementa su movilidad y facilita su transporte hacia las aguas subterráneas o su absorción por las plantas (Alloway, 2013). Por el contrario, en suelos con pH neutro o alcalino, el cadmio tiende a inmovilizarse mediante la formación de complejos con carbonatos, hidróxidos y fosfatos, reduciendo significativamente su desplazamiento en el perfil del suelo (Swartjes, 2011).

Otra propiedad clave es la capacidad de intercambio catiónico (CIC), la cual refleja la habilidad del suelo para retener cationes metálicos en las superficies cargadas de las arcillas y la materia orgánica. Suelos con alta CIC presentan mayor capacidad de adsorción del cadmio, disminuyendo su movilidad y biodisponibilidad (Kabata-Pendias, 2010). Asimismo, para Brady y Weil (2008) la textura del suelo influye de manera directa en la retención del metal; los suelos con mayor contenido de arcilla y limo ofrecen más sitios de adsorción que los suelos arenosos, donde el cadmio puede desplazarse con mayor facilidad debido a la baja retención y a una mayor permeabilidad. En contextos mineros, los suelos degradados suelen presentar texturas gruesas y baja CIC, lo que incrementa el riesgo de dispersión del cadmio en el ambiente.

El contenido de materia orgánica también desempeña un papel fundamental en la regulación de la movilidad del cadmio, ya que actúa como agente complejante a través de sustancias húmicas y fúlvicas. Estas interacciones pueden generar complejos estables que inmovilizan el metal o, en algunos casos, complejos solubles que favorecen su transporte, dependiendo del grado de humificación y de las condiciones químicas del suelo (Sauvé

et al., 2000). Adicionalmente, factores como la conductividad eléctrica y la presencia de otros cationes competidores (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Zn^{2+}) pueden modificar la movilidad del cadmio al influir en los equilibrios de adsorción y desorción. En conjunto, la interacción entre estas propiedades del suelo determina el comportamiento dinámico del cadmio, siendo un aspecto clave para el diseño de estrategias de remediación y fitoestabilización en suelos impactados por actividades mineras.

2.2.2.5. Interacción suelo – planta – microorganismo en zonas degradadas

En zonas degradadas por actividades mineras, la interacción entre el suelo, las plantas y los microorganismos constituye un sistema dinámico clave para los procesos de recuperación y remediación ambiental. Los suelos impactados por metales pesados, como el cadmio, suelen presentar alteraciones significativas en sus propiedades físico-químicas y biológicas, tales como acidificación, baja disponibilidad de nutrientes y reducción de la actividad microbiana (Gadd, 2010). Estas condiciones limitan el establecimiento vegetal y afectan la rizosfera, espacio donde se producen intercambios bioquímicos esenciales entre raíces, microorganismos y el suelo. Las plantas adaptadas a ambientes extremos, especialmente especies nativas, pueden modificar el entorno edáfico mediante la exudación de compuestos orgánicos que influyen en la disponibilidad de nutrientes y metales, promoviendo la colonización microbiana y mejorando la estabilidad del suelo (Barea et al., 2011).

Los microorganismos del suelo, particularmente bacterias rizosféricas y hongos micorrícicos arbusculares, desempeñan un rol fundamental en la regulación de la biodisponibilidad de los metales pesados y en la tolerancia vegetal al estrés metálico. Estos organismos pueden inmovilizar el cadmio a través de procesos como biosorción, bioacumulación y precipitación, o bien modificar su forma química mediante reacciones

de oxidación–reducción, disminuyendo su toxicidad (Gadd, 2010). Asimismo, la simbiosis micorrícica mejora la absorción de agua y nutrientes esenciales, fortalece el crecimiento radicular y contribuye a la fitoestabilización del metal en el sistema suelo–raíz, reduciendo su transferencia hacia las partes aéreas de la planta (Smith & Read, 2008).

Desde una perspectiva ecológica y de remediación, la interacción suelo–planta–microorganismo favorece la restauración funcional de ecosistemas degradados al promover procesos de estabilización del suelo, ciclado de nutrientes y aumento de la biodiversidad edáfica. En ambientes altoandinos afectados por la minería, estas interacciones adquieren especial relevancia debido a las condiciones climáticas adversas y a la fragilidad del suelo. La utilización de especies vegetales nativas en asociación con comunidades microbianas adaptadas, puede potenciar estrategias de fitorremediación y recuperación ecológica, contribuyendo a la reducción del impacto del cadmio y al restablecimiento progresivo de los servicios ecosistémicos del suelo (Barea et al., 2011; Kabata-Pendias, 2010).

2.2.3. Especie *Polylepis incana* (queñua) como agente de remediación

2.2.4.1. Características botánicas

Polylepis incana Kunth es una especie arbórea nativa de los Andes centrales, perteneciente a la familia Rosaceae, que se distribuye principalmente en ecosistemas altoandinos entre los 3 500 y 4 800 m s. n. m. Se caracteriza por su porte arbóreo o arbustivo, alcanzando alturas variables entre 3 y 10 metros, dependiendo de las condiciones ambientales. Una de sus características botánicas más distintivas es la presencia de una corteza exfoliante, compuesta por múltiples láminas delgadas de color marrón rojizo, que actúa como mecanismo de protección frente a las bajas temperaturas,

la radiación solar intensa y los vientos propios de zonas de alta montaña (Kessler & Schmidt-Lebuhn, 2006; Simpson, 1979). Esta adaptación morfológica permite a la especie sobrevivir en ambientes extremos y degradados, donde otras especies leñosas no logran establecerse.

Desde el punto de vista foliar, *Polylepis incana* presenta hojas compuestas, imparipinnadas, con foliolos pequeños, coriáceos y pubescentes, lo que reduce la pérdida de agua por transpiración y aumenta la tolerancia al estrés hídrico y térmico. El sistema radicular es profundo y bien desarrollado, favoreciendo la estabilización del suelo y la absorción de agua y nutrientes en suelos pobres o erosionados (Zutta et al., 2012). Esta arquitectura radicular resulta especialmente relevante en contextos de remediación ambiental, ya que contribuye a la fijación de partículas del suelo, disminuye los procesos erosivos y facilita la interacción con microorganismos del suelo en la rizosfera, aspectos clave para la inmovilización de metales pesados.

Asimismo, *Polylepis incana* presenta una elevada plasticidad ecológica y una notable capacidad de adaptación a suelos con baja fertilidad, alta acidez y presencia de elementos potencialmente tóxicos. Estudios ecológicos han señalado que los bosques de *Polylepis* generan microambientes favorables, incrementando el contenido de materia orgánica y mejorando la estructura del suelo bajo su dosel, lo que favorece procesos de recuperación edáfica (Cierjacks et al., 2007). Estas características botánicas, combinadas con su condición de especie nativa y su adaptación a ecosistemas altoandinos degradados, sustentan su potencial como agente de remediación y restauración ecológica en áreas impactadas por actividades mineras, como el caso de la mina Santa Bárbara.

Figura 1

Especie *Polylepis incana* (queñua)



Nota. Tomado de: https://es.wikipedia.org/wiki/Polylepis_racemosa

2.2.4.2. Distribución geográfica y ecológica de *polylepis incana*

Polylepis incana presenta una distribución geográfica característica de los Andes centrales, abarcando principalmente territorios de Perú, Bolivia y, en menor medida, Ecuador. En el Perú, esta especie se encuentra ampliamente distribuida en la sierra central y sur, formando bosques relictos en regiones altoandinas como Junín, Ayacucho, Cusco, Puno y Huancavelica, donde ocupa laderas, quebradas y zonas de difícil acceso entre los 3 500 y 4 800 m s. n. m. (Kessler & Schmidt-Lebuhn, 2006). Su presencia en altitudes extremas la convierte en uno de los árboles que crecen a mayor altura a nivel mundial,

evidenciando una notable capacidad de adaptación a condiciones ambientales severas, como bajas temperaturas, alta radiación solar y suelos someros y pedregosos.

Desde el punto de vista ecológico, *Polylepis incana* se desarrolla en ecosistemas frágiles caracterizados por climas fríos y secos, con marcadas variaciones térmicas diurnas y estacionales. Prefiere suelos de origen coluvial o residual, generalmente poco profundos, con bajo contenido de nutrientes y, en muchos casos, afectados por procesos de erosión y degradación antrópica (Cierjacks et al., 2007). Los bosques de *Polylepis* cumplen un rol ecológico fundamental al actuar como reguladores microclimáticos, mejorar la retención de humedad y favorecer la acumulación de materia orgánica, creando condiciones más estables para la biodiversidad edáfica y vegetal asociada. Estas características ecológicas refuerzan la importancia de *Polylepis incana* como especie estratégica para programas de restauración y remediación ambiental en zonas altoandinas impactadas por la actividad minera.

En el artículo de Zutta et al. (2012) se reporta información gráfica y mediante una tabla la distribución geográfica de esta especie.

Tabla 2

Descripción de la distribución de especies de Polylepis, notas sobre la ecología y estado de conservación.*

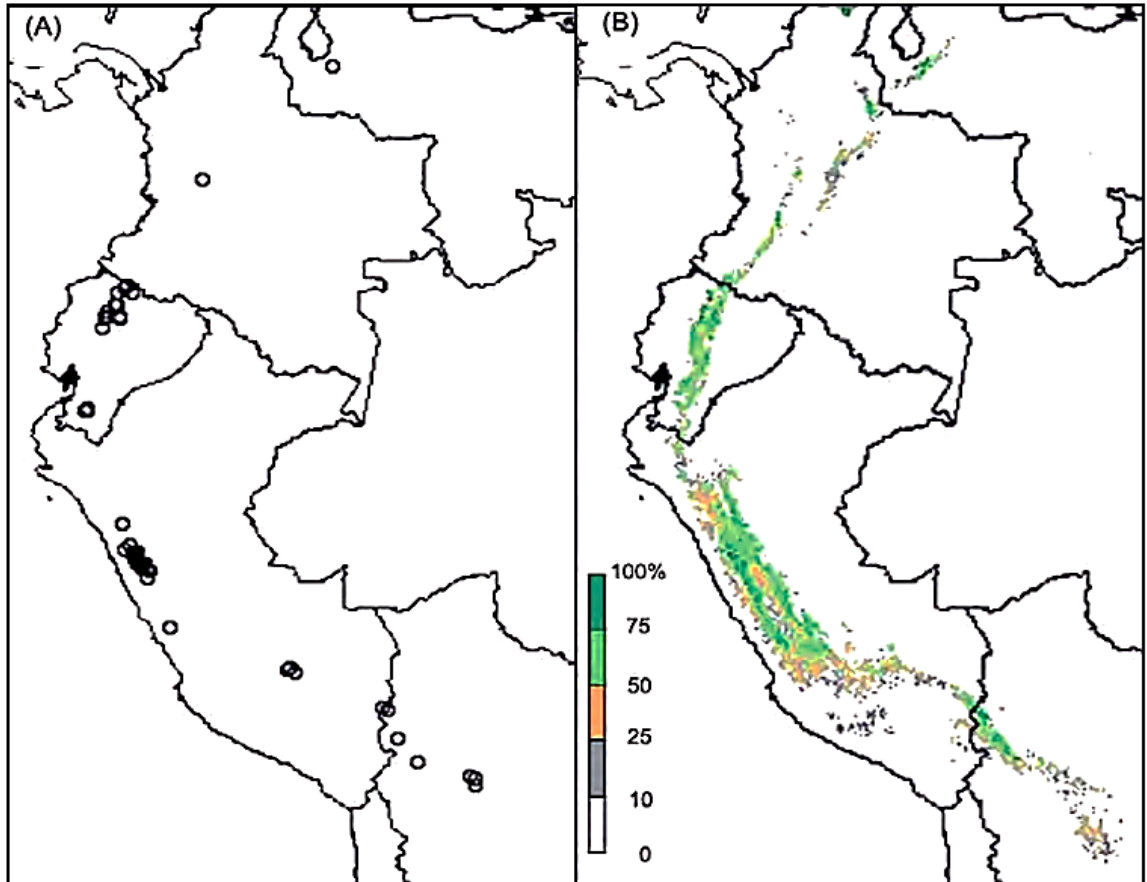
Especie	Distribución	Notas sobre ecología
<i>P. australis</i>	Central y nor-oeste de Argentina ^(e)	Alto bosque nublado, restringida a laderas y barrancos.
<i>P. besseri</i>	Sur Perú a Bolivia	De 3000-4100 m, en algunas áreas a menudo se forman bosques puros.
<i>P. canoi</i>	Ayacucho, Cusco y Junín, Perú ^(e)	De 3350-3400 m.
<i>P. crista-galli</i>	Sur de Bolivia a norte de Argentina ^(v)	Por debajo de 3000 a 3900 m, favorece laderas secas en las elevaciones más bajas.
<i>P. flaoipila</i>	Andina occidental del centro del Perú ^(e)	Pendientes áridas de 3600-4100 m.
<i>P. hieronymi</i>	Sur de Bolivia hasta el norte de Argentina ^(v)	Especie pionera que se encuentra por debajo 3000-3400 m y laderas orientales.
<i>P. incana</i>	Ecuador hasta el sur de Perú ^(v)	Laderas occidentales de Ecuador desde 3500-4100 m. Hasta 4200 m en Perú.

Especie	Distribución	Notas sobre ecología
<i>P. incarum</i>	Sur Peruano a Bolivia	Principalmente en 3800-4200 m en zonas con lluvias estacionales.
<i>P. lanata</i>	Sur Peruano a Bolivia	Pendientes envueltas en neblina de 2900-4100 m.
<i>P. lamiginosa</i>	Ecuador ^(e, v)	Limitados a ambientes áridos de montaña.
<i>P. microphylla</i>	Ecuador y aislado en Perú ^(e, v)	Aislado en el Volcán Chimborazo, Ecuador y trasplantes precolombinos en Perú.
<i>P. multijuga</i>	Norte del Perú ^(e, v)	Bosques montañosos bajos.
<i>P. neglecta</i>	Central y sur de Bolivia ^(e, v)	Encontrado en 2400-3500 m y tiende a crecer en arroyos o en lomas expuestas.
<i>P. pacensis</i>	Bolivia occidental ^(e)	Valles inter-andinos y cordilleras occidentales desde 3200-4100 m.
<i>P. pauta</i>	Ecuador y aislado en Perú y Bolivia ^(v)	Bosques de montaña hasta 4000 m, en zonas con neblina frecuentes.
<i>P. pepeii</i>	Perú central hasta el noreste de Bolivia ^(v)	En la zona de transición de los bosques montañosos húmedos a pajonales de puna.
<i>P. quadrijuga</i>	Cordilleras orientales de Colombia ^(e)	Por encima de la línea de bosque continuo hasta el páramo.
<i>P. racemosa</i>	Perú a Bolivia, y aislado en Ecuador ^(v)	Límite superior de bosques montañosos húmedos y zonas de niebla frecuentes.
<i>P. reticulata</i>	Ecuador y aislado en el norte y centro del Perú ^(v)	Se encuentran en los bosques nublados altos y algunos valles interandinos.
<i>P. rugulosa</i>	Suroeste de Perú a extremo norte de Chile ^(v)	Entre 3000-4600 m por cañón y laderas orientados sudoeste.
<i>P. sericea</i> **	Venezuela a Bolivia	Bosques húmedos de montaña, de 2600 m hasta 4100 m en muchas zonas del Perú.
<i>P. subsericans</i>	Centro y sur de Perú ^(e, v)	Encontrado en 2900-5100 m, a menudo en las partes altas de cañones.
<i>P. subtusalhida</i>	Sur de Perú y Bolivia central ^(e)	En las regiones con una precipitación anual de 600 mm y una altura de 3000-4500 m.
<i>P. tampacana</i>	Frontera de Argentina, Bolivia, Chile, y Perú ^(c)	Se encuentran en alturas extremas de 4000-5200 m y paisajes áridos.
<i>P. tonentella</i>	Bolivia a Argentina, y aislado en Perú central	Ocupan una variedad de hábitats de mucha altitud con precipitaciones de 450-800 mm.
<i>P. triacontandra</i>	Sur de Perú a Bolivia, aislado en centro de Perú	Altos límites de los bosques húmedos, a 4000 m en regiones con niebla frecuente.
<i>P. weberbaueri</i> **	Ecuador hasta el sur de Perú ^(v)	Los bosques húmedos montañosos, de 2500-4300 m.

Nota. * De acuerdo al 2011 Lista Roja de Especies Amenazadas. ** Especies modelado. (e) Endémico, (v) Vulnerable, (c) Casi amenazada. Tomado de Zutta et al. (p. 206, 2012).

Figura 2

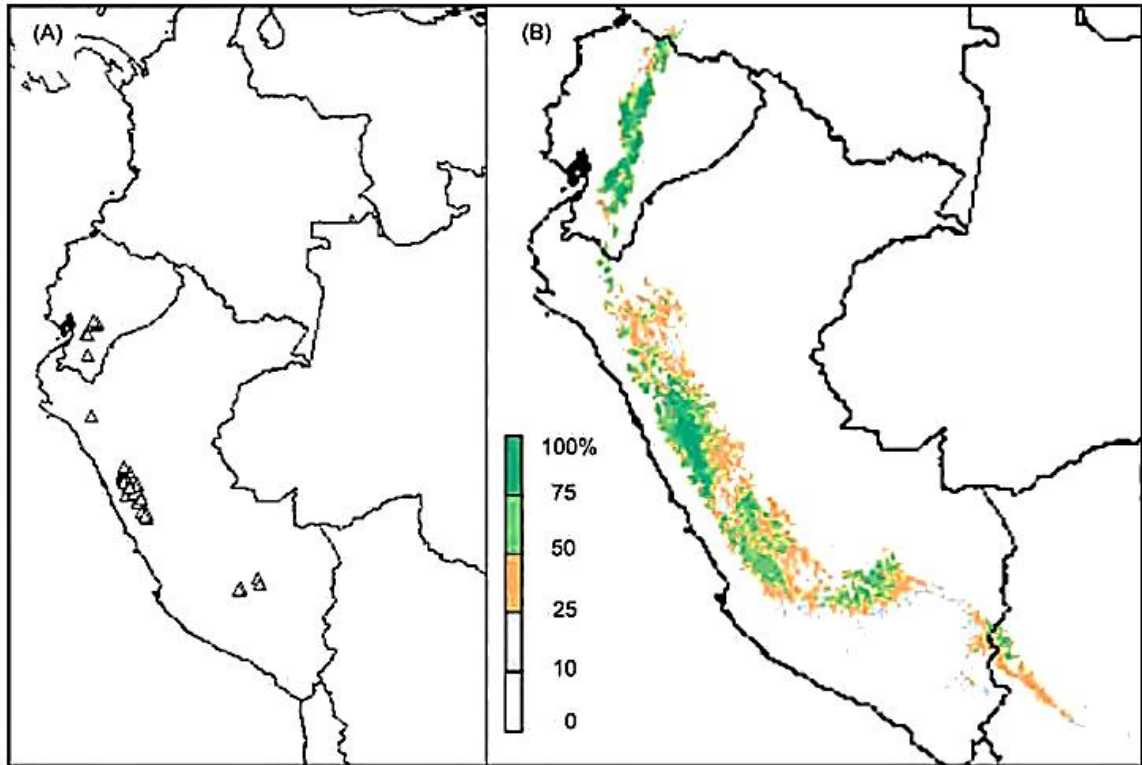
Observaciones geográficas (América) representan la presencia observada de una especie



Nota. Tomado de Zutta et al. (p. 206, 2012). (A) Las localidades para *P. sericea* (N = 85) desde Venezuela hasta Bolivia y (B) distribución potencial.

Figura 3

Observaciones geográficas (Perú) representan la presencia observada de una especie



Nota. Tomado de Zutta et al. (p. 208, 2012). (A) Las localidades para *P. weberbaueri* (N = 82) desde Ecuador y poblaciones aisladas en Perú y (B) distribución potencial.

2.2.4.3. Importancia ecológica de *Polylepis* en ecosistemas altoandinos

Los bosques de *Polylepis* constituyen uno de los ecosistemas forestales más singulares y valiosos de los Andes, desempeñando un rol ecológico fundamental en la estabilidad y funcionamiento de los ecosistemas altoandinos. Debido a su capacidad para desarrollarse en altitudes extremas, estas formaciones vegetales actúan como barreras naturales frente a procesos de erosión hídrica y eólica, contribuyendo a la protección del suelo en laderas pronunciadas y zonas degradadas (Kessler & Schmidt-Lebuhn, 2006). El denso entramado radicular de *Polylepis* favorece la cohesión del suelo, reduce la pérdida

de partículas finas y mejora la infiltración del agua, lo cual resulta especialmente relevante en regiones sometidas a intensas lluvias estacionales y a una fuerte presión antrópica.

Desde una perspectiva ecológica y biogeoquímica, los bosques de *Polylepis* cumplen un papel clave en la regulación del microclima y en el mantenimiento de los ciclos de nutrientes. La cobertura arbórea atenúa las fluctuaciones térmicas extremas características de los ecosistemas altoandinos, incrementa la humedad relativa y favorece la acumulación de hojarasca, lo que se traduce en un aumento del contenido de materia orgánica y en una mejora progresiva de la estructura del suelo (Cierjacks et al., 2007). Estos procesos promueven la actividad microbiana y el establecimiento de comunidades vegetales asociadas, fortaleciendo la resiliencia del ecosistema frente a perturbaciones naturales y antrópicas, como la minería, el sobrepastoreo y la deforestación.

Asimismo, *Polylepis* posee una elevada importancia ecológica por su contribución a la conservación de la biodiversidad altoandina. Los bosques de esta especie albergan una gran diversidad de flora y fauna, incluyendo numerosas especies endémicas y amenazadas, particularmente aves y artrópodos especializados que dependen de estos hábitats para su supervivencia (Kessler & Schmidt-Lebuhn, 2006; Lloyd, 2008). La pérdida y fragmentación de los bosques de *Polylepis* implica no solo la degradación del suelo, sino también la alteración de redes ecológicas complejas. En este contexto, la conservación y restauración de *Polylepis* resulta estratégica para mantener los servicios ecosistémicos y promover la recuperación ecológica de los ecosistemas altoandinos.

2.2.4. Papel de las bacterias en la biorremediación del Cd (EM-COMPOST)

2.2.5.1. Bacterias resistentes a metales pesados (MRB)

Las bacterias desempeñan un papel fundamental en la biorremediación de suelos contaminados con cadmio (Cd) debido a su capacidad para interactuar directamente con este metal y modificar su comportamiento en el ambiente edáfico. Diversos grupos bacterianos pueden reducir la movilidad y biodisponibilidad del Cd mediante mecanismos como la biosorción, la bioacumulación, la precipitación y la complejación con metabolitos extracelulares. Estos procesos permiten que el cadmio sea inmovilizado en la matriz del suelo o retenido en estructuras celulares bacterianas, disminuyendo su toxicidad para las plantas y otros organismos (Gadd, 2010). En suelos degradados por actividades mineras, donde las propiedades físico-químicas suelen estar alteradas, la actividad bacteriana constituye un componente clave para la recuperación funcional del sistema suelo.

En este contexto, el EM-COMPOST (*Effective Microorganisms Compost*) representa una estrategia biotecnológica que combina materia orgánica estabilizada con consorcios microbianos beneficiosos, principalmente bacterias ácido-lácticas, bacterias fotosintéticas, actinomicetos y otros microorganismos heterótrofos. Estos consorcios bacterianos contribuyen a la biorremediación del cadmio al mejorar las condiciones biológicas y químicas del suelo, incrementar el contenido de materia orgánica y favorecer la formación de complejos estables entre el Cd y los compuestos húmicos del compost (Vangronsveld et al., 2009). Además, la actividad metabólica bacteriana puede inducir cambios en el pH y en el potencial redox del suelo, factores que influyen directamente en la solubilidad y movilidad del cadmio.

Asimismo, la aplicación de EM-COMPOST favorece el desarrollo de una microbiota edáfica más diversa y funcional, lo que potencia los procesos de inmovilización biológica del Cd y reduce su riesgo ambiental. Estudios en suelos

contaminados han demostrado que la incorporación de enmiendas orgánicas con alta actividad microbiana disminuye la fracción biodisponible de metales pesados, aun cuando la concentración total permanezca constante (Park et al., 2011). En este sentido, el papel de las bacterias presentes en el EM-COMPOST no se orienta a la eliminación del cadmio del sistema, sino a su estabilización y a la recuperación progresiva de la calidad del suelo, constituyéndose en un complemento importante para estrategias integradas de biorremediación y restauración ecológica.

2.2.5.2. Rol de la rizósfera en la inmovilización del Cd

La rizósfera, definida como la zona del suelo directamente influenciada por la actividad radicular, desempeña un rol clave en la inmovilización del cadmio (Cd) en suelos contaminados. En esta interfase suelo-planta se producen intensos procesos físicos, químicos y biológicos que modifican la disponibilidad y movilidad del metal. Las raíces liberan exudados orgánicos, como ácidos orgánicos, aminoácidos y compuestos fenólicos, que pueden favorecer la adsorción del Cd en las partículas del suelo o su complejación con la materia orgánica, reduciendo su fracción biodisponible (Hinsinger et al., 2009). Asimismo, la actividad radicular puede inducir cambios locales en el pH y en el potencial redox, condiciones que influyen directamente en la solubilidad del cadmio y favorecen su inmovilización en formas menos móviles (Alloway, 2013).

De manera complementaria, la rizósfera alberga comunidades microbianas altamente activas que contribuyen a la estabilización del cadmio mediante mecanismos de biosorción, bioacumulación y precipitación. Bacterias y hongos asociados a las raíces pueden retener Cd en sus paredes celulares o transformarlo en complejos menos tóxicos, disminuyendo su transporte hacia las partes aéreas de la planta (Gadd, 2010). Además, la interacción sinérgica entre raíces, microorganismos y materia orgánica promueve la

formación de agregados estables en el suelo, lo que limita la movilidad del metal en el perfil edáfico. En conjunto, estos procesos convierten a la rizósfera en un componente estratégico para la inmovilización del Cd y para el diseño de estrategias de fitorremediación orientadas a la fitoestabilización en suelos degradados por actividades mineras.

2.2.5.3. Interacciones: bacteria-planta-suelo en la fitoestabilización

La fitoestabilización se basa en la interacción sinérgica entre las plantas, el suelo y las comunidades bacterianas asociadas, particularmente en la rizósfera, donde se desarrollan procesos clave para la inmovilización de metales pesados como el cadmio (Cd). En este sistema, las plantas actúan como estructuras estabilizadoras del suelo mediante sus raíces, mientras que las bacterias influyen en la disponibilidad del metal a través de mecanismos bioquímicos. Las bacterias rizosféricas pueden adsorber Cd en sus paredes celulares, producir sustancias poliméricas extracelulares y modificar el pH y el potencial redox del suelo, favoreciendo la retención del metal en formas menos móviles (Gadd, 2010; Vangronsveld et al., 2009). Estas interacciones reducen el riesgo de lixiviación y dispersión del contaminante, aspecto fundamental en suelos mineros degradados. Del estudio de Gadd se deriva una tabla resumen del proceso:

Tabla 3
Mecanismos para la fitoestabilización

Mecanismo Microbiano	Proceso en la Fitoestabilización	Efecto en Metales/Contaminantes
Bioprecipitación	Bacterias y hongos producen sustancias (como sulfuro de hidrógeno o fosfato) que reaccionan con metales.	Los metales solubles y tóxicos (Pb, Cd, Zn) forman minerales insolubles y estables en el suelo.
Adsorción y Bioacumulación	Las células microbianas y sus productos extracelulares (como biopelículas) se unen físicamente a los iones metálicos.	La movilidad y biodisponibilidad de los metales en el suelo se reducen significativamente.
Inmovilización Redox	Algunos microbios transforman metales cambiando su estado de oxidación (p.ej., Cr(VI) a Cr(III)).	Se generan formas menos móviles, menos tóxicas y más estables de los metales.
Producción de Sideróforos	Los microbios liberan moléculas que capturan hierro, pero que también pueden unirse a otros metales.	Se modifica la solubilidad y se controla la disponibilidad de metales para las plantas.
Formación de Biominerales	Los productos del metabolismo microbiano catalizan la formación de nuevos minerales en el suelo.	Los contaminantes quedan encapsulados en estructuras minerales estables a largo plazo.

Nota. Adaptado de Gadd (2010).

Por su parte, la planta cumple un rol central al crear un entorno favorable para la actividad bacteriana mediante la liberación de exudados radiculares ricos en carbono y nutrientes. Estos compuestos estimulan el crecimiento microbiano y fortalecen los procesos de biosorción y complejación del Cd en la rizósfera (Hinsinger et al., 2009). A su vez, las bacterias beneficiosas pueden mejorar el estado nutricional y la tolerancia de la planta al estrés metálico, lo que permite un mayor desarrollo radicular y una cobertura vegetal más eficiente. Este intercambio funcional fortalece la estabilidad física y química del suelo, promoviendo la formación de agregados y la inmovilización del metal en la matriz edáfica.

2.3. Hipótesis

a) Hipótesis general

La incorporación de *Polylepis incana* (queñua) reduce la concentración de Cd y mejora indicadores de calidad del suelo en comparación con parcelas sin *queñua* durante el periodo de estudio.

b) Hipótesis específica

- Las parcelas solo con *queñua* (parcela 2) tendrán una reducción de Cd a lo largo de los seis meses comparadas con la parcela 1 (suelo solo).
- Las parcelas solo con inoculación bacteriana (parcela 3) tendrán una reducción de Cd a lo largo de los seis meses comparadas con la parcela 1 (suelo solo).
- La presencia de Cd se correlaciona con las propiedades físico-químicas de los suelos a lo largo de los seis meses.

2.4. Definición de términos

a) Cadmio

Es un metal pesado tóxico presente en el suelo de forma natural o por actividades antrópicas, como la minería. Su movilidad y biodisponibilidad dependen de las propiedades físico-químicas del suelo (Brady & Weil, 2008).

b) EM-COMPOST

Es una enmienda orgánica obtenida a partir de la descomposición controlada de materia orgánica, enriquecida con consorcios de microorganismos eficientes, principalmente bacterias beneficiosas, que contribuyen a mejorar la calidad biológica y química del suelo y a la inmovilización de contaminantes como los metales pesados (BIOEM, 2025).

c) *Polylepis incana*

Es una especie arbórea nativa de los ecosistemas altoandinos, perteneciente a la familia Rosaceae, adaptada a condiciones climáticas extremas y suelos degradados, con potencial para la restauración ecológica y la fitoestabilización de suelos contaminados (Kessler & Schmidt-Lebuhn, 2006).

d) Propiedades edáficas del suelo

Son el conjunto de características físicas, químicas y biológicas del suelo que determinan su comportamiento, fertilidad, calidad ambiental y capacidad para retener, transformar o movilizar sustancias, incluidos nutrientes y contaminantes (Brady & Weil, 2008).

e) Suelo

Es un sistema natural dinámico compuesto por minerales, materia orgánica, agua, aire y organismos vivos, que se forma por procesos físicos, químicos y biológicos, y cumple funciones esenciales como soporte para la vegetación, regulación hídrica y reciclaje de nutrientes (Brady & Weil, 2008).

2.5. Variables

a) Variable independiente: Incorporación de *Polylepis incana* (queñua)

b) Variables dependientes:

- Cadmio (Cd)
- pH
- Carbono orgánico
- Fósforo
- Nitrógeno
- Potasio
- Conductividad eléctrica
- Capacidad de intercambio Catiónico
- Sodio
- Magnesio
- Densidad aparente

2.6. Operacionalización de variables

Matriz de operacionalización de las variables dependientes (medidas)

Tabla 4

Matriz de operacionalización de las variables dependientes (medidas) en el estudio

Variable	Definición		Indicador	Unidad	Método de análisis	L.C.M: *	Instrumentos
	Conceptual	Operacional					
Cadmio (Cd)	El cadmio es un metal pesado tóxico, presente en suelos contaminados por actividades mineras. Su cuantificación permite determinar el nivel de impacto ambiental y evaluar la eficacia de la remediación mediante <i>Polylepis incana</i> y microorganismos.	Determinación mediante digestión ácida y cuantificación por espectrofotometría atómica (AAS) o ICP-OES.	Cadmio total.	mg/kg.	Digestión EPA 3050/3051 + lectura AAS/ICP.	0.01 mg/kg Concentraciones inferiores a 0.01 mg/kg no son detectables con precisión por el método.	AAS o ICP-OES.
pH	El pH del suelo es una medida de la acidez o alcalinidad del suelo, expresada en función de la concentración de iones hidrógeno (H ⁺). Controla la disponibilidad de nutrientes, la actividad microbiana y la movilidad de metales pesados como el cadmio.	Valor numérico obtenido al mezclar suelo con agua en proporción 1:2.5 y medir con un pH-metro calibrado.	Valor de pH.	Escala numérica adimensional (0–14).	Medición potenciométrica (pH-metro).	± 0.05 Indica que el método puede cuantificar variaciones de pH iguales o superiores a 0.05 unidades.	pH-metro digital.
Carbono orgánico (CO)	El carbono orgánico del suelo representa la fracción de carbono presente en la materia orgánica. Es indicador fundamental de fertilidad, capacidad de retención de agua, agregación del suelo y procesos de biorremediación, ya que influye en la retención o inmovilización de metales pesados.	Resultado obtenido mediante digestión húmeda (Walkley-Black o método equivalente) expresado en g/kg de suelo seco.	Concentración de carbono orgánico.	g/kg de materia seca (MS).	Oxidación húmeda o análisis volumétrico.	0.10 g/kg Valores por debajo de este límite no pueden cuantificarse con precisión.	Equipo de digestión y titulación.

Variable	Definición		Indicador	Unidad	Método de análisis	L.C.M: *	Instrumentos
	Conceptual	Operacional					
Fósforo (P)	El fósforo disponible es la fracción del elemento que puede ser absorbida por las plantas. Está asociado al crecimiento radicular y a la formación de biomasa, lo que influye en la capacidad de fitoremediación de especies como <i>Polylepis incana</i> .	Medición de P extraído mediante método Olsen o Bray, según condición del suelo.	P disponible.	mg/kg de suelo.	Colorimetría o espectrofotometría.	1.00 mg/kg Solo se reportan concentraciones iguales o superiores a 1 mg/kg.	Espectrofotómetro UV-Visible.
Nitrógeno (N)	El nitrógeno total es la cantidad de nitrógeno presente en el suelo en forma orgánica e inorgánica. Es un indicador de la fertilidad del suelo y de la materia orgánica disponible para procesos microbianos relacionados con la remediación.	Determinación del N mediante método Kjeldahl o análisis elemental.	N total.	g/kg.	Digestión Kjeldahl.	0.05 g/kg.	Sistema Kjeldahl.
Potasio (K)	El potasio intercambiable es la cantidad de potasio disponible para las plantas y los microorganismos. Participa en procesos fisiológicos vegetales que influyen en el crecimiento de <i>Polylepis incana</i> y en la respuesta del suelo a la contaminación.	Determinación de K extraíble por acetato de amonio u otro extractante estándar.	K intercambiable.	mg/kg.	Espectrofotometría o fotometría de llama.	1.00 mg/kg.	Fotómetro de llama o ICP-OES.
Conductividad eléctrica (CE)	La conductividad eléctrica expresa la concentración de sales solubles en el suelo. Es indicador del nivel de salinidad y afecta la disponibilidad de nutrientes y la movilidad de metales como el cadmio.	Medición en extracto de suelo 1:5 mediante conductivímetro.	CE del suelo.	dS/m (deciSiemens por metro).	Medición directa con conductivímetro.	0.01 dS/m.	Conductivímetro digital.
Capacidad de intercambio	La CIC es la capacidad del suelo para retener e intercambiar cationes (Ca^{2+} ,	Cuantificación mediante saturación con cationes (NH_4^+ ,	CIC total.	mol/kg (en el informe aparece	Titulométrico o	0.10 mol/kg.	Equipo de extracción y titulación.

Variable	Definición		Indicador	Unidad	Método de análisis	L.C.M: *	Instrumentos
	Conceptual	Operacional					
catiónico (CIC)	Mg ²⁺ , Na ⁺ , K ⁺ , etc.). Controla la fertilidad, estabilidad estructural y la retención de metales pesados como Cd, influyendo directamente en los procesos de remediación.	Ba ²⁺) y posterior desplazamiento controlado.		como mol/Kg; en muchos laboratorios se reporta como cmol(+)/kg).	espectrofotométrico.		
Sodio (Na)	El sodio intercambiable es la fracción disponible del elemento en el suelo. Altas concentraciones pueden provocar dispersión de arcillas, afectar la estructura del suelo y modificar la movilidad del Cd.	Extracción de Na con solución estándar y cuantificación instrumental.	Na intercambiable.	mg/kg.	Fotometría de llama o ICP-OES.	1.00 mg/kg.	Fotómetro o ICP-OES.
Magnesio (Mg)	El magnesio intercambiable es un nutriente esencial que participa en la estructura del suelo y en el balance catiónico. Afecta la retención y competencia con otros cationes, incluido el Cd.	Extracción con acetato de amonio y determinación instrumental.	Mg intercambiable.	mg/kg.	ICP-OES o fotometría.	1.00 mg/kg.	ICP-OES.
Densidad aparente (Da)	La densidad aparente es la masa de suelo seco por unidad de volumen. Indica el grado de compactación y la porosidad del suelo. Su variación puede influir en la infiltración, aireación y movilidad de contaminantes como el Cd.	Determinación mediante método del cilindro (anillo) volumétrico seco a 105 °C.	Densidad aparente.	g/cm ³ .	Gravimétrico.	0.02 g/cm ³ .	Cilindro volumétrico y balanza analítica.

Nota. * El Límite de Cuantificación del Método (L.C.M.) es la menor concentración de un analito que puede ser detectada y cuantificada con precisión y exactitud aceptables por el método analítico empleado. Valores por debajo del L.C.M. se reportan como “< L.C.M.” Garantiza confiabilidad en las mediciones y define el umbral mínimo de interpretación científica.

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Ámbito temporal y espacial

La investigación se desarrolló en inmediaciones de la mina Santa Bárbara, ubicada en el distrito de Santa Bárbara, provincia y región Huancavelica, Perú en el año 2025. Esta zona se caracteriza por un histórico impacto ambiental asociado a actividades mineras, lo cual ha generado suelos con altos niveles de metales pesados, particularmente cadmio (Cd).

Las unidades experimentales se emplazaron en un sector representativo del área impactada, donde se delimitaron cuatro parcelas de intervención, cada una destinada a un tratamiento distinto:

- Parcela 1: Suelo sin intervención (control).
- Parcela 2: Suelo + *Polylepis incana* (queñua).
- Parcela 3: Suelo + inoculación bacteriana.
- Parcela 4: Suelo + inoculación bacteriana + *Polylepis incana*.

Todas las parcelas se ubicaron en un mismo continuo ecológico, bajo condiciones ambientales de alta montaña, con coordenadas UTM Estándar aproximadas:

- Norte: 8583893.81
- Este: 502726.05
- Altitud: 3 972 m s. n. m.

La elección de este ámbito espacial corresponde a la necesidad de evaluar el comportamiento real de las especies nativas y de los tratamientos aplicados en condiciones edáficas genuinas de un pasivo minero altoandino, permitiendo generar evidencia directa y aplicable a la zona altoandina.

El estudio se desarrolló durante el periodo comprendido entre marzo y agosto del año 2025, considerando un total de seis meses de evaluación continua. Durante este periodo se llevaron a cabo las siguientes acciones:

- Seis campañas de monitoreo y muestreo del suelo (una por mes).
- Aplicación inicial de los tratamientos experimentales en marzo de 2025.
- Evaluación mensual de las variables dependientes: pH, carbono orgánico, fósforo, nitrógeno, potasio, conductividad eléctrica, capacidad de intercambio catiónico, cadmio, sodio, magnesio y densidad aparente.
- Registro sistemático de condiciones ambientales, necesarias para interpretar la dinámica del suelo.

El ámbito temporal de seis meses permitió observar los cambios en la calidad del suelo durante una fase de establecimiento inicial del tratamiento con *Polylepis incana* y de la acción combinada con bacterias, proporcionando información relevante sobre la eficacia inmediata y la tendencia de remediación en el corto plazo.

3.2. Tipo de investigación

La presente investigación fue de tipo aplicada, debido a que buscó generar conocimientos con un fin práctico orientado a resolver un problema ambiental concreto: la remediación de suelos impactados por cadmio mediante el uso de *Polylepis incana* y la inoculación bacteriana. Este tipo de investigación se caracteriza por utilizar información científica para posteriormente intervenir directamente en una realidad problemática con miras a transformar o mejorar sus condiciones (Supo, 2025).

3.3. Nivel de investigación

Respecto al nivel, el estudio se ubica en el nivel explicativo, ya que pretende determinar el efecto causal de los tratamientos aplicados sobre la concentración de cadmio y las propiedades fisicoquímicas del suelo. El objetivo no es solo describir o comparar los resultados, sino explicar cómo y por qué los tratamientos (con *queñua* y/o bacterias) influyen en las variables del suelo (Hernández et al., 2014). El nivel explicativo es el más apropiado cuando se busca establecer relaciones causales entre variables dependientes e independientes bajo condiciones controladas.

3.4. Métodos de investigación

La investigación se enmarca en el método científico, entendido como un proceso sistemático, crítico y controlado de generación de conocimiento basado en observación, planteamiento de hipótesis, experimentación y verificación empírica (Hair et al., 1999). En esta investigación se siguieron las etapas del método científico: Observación y

diagnóstico del problema (contaminación por Cd), Formulación de hipótesis sobre la eficacia de *Polylepis incana*, Experimentación mediante parcelas con diferentes tratamientos, Recolección de datos de campo y laboratorio, Análisis estadístico y Contrastación de hipótesis.

El estudio emplea el método experimental, entendido como la manipulación deliberada de una o más variables independientes para observar sus efectos sobre variables dependientes en condiciones controladas (Campbell & Stanley, 1995).

En este caso se manipularon los siguientes tratamientos:

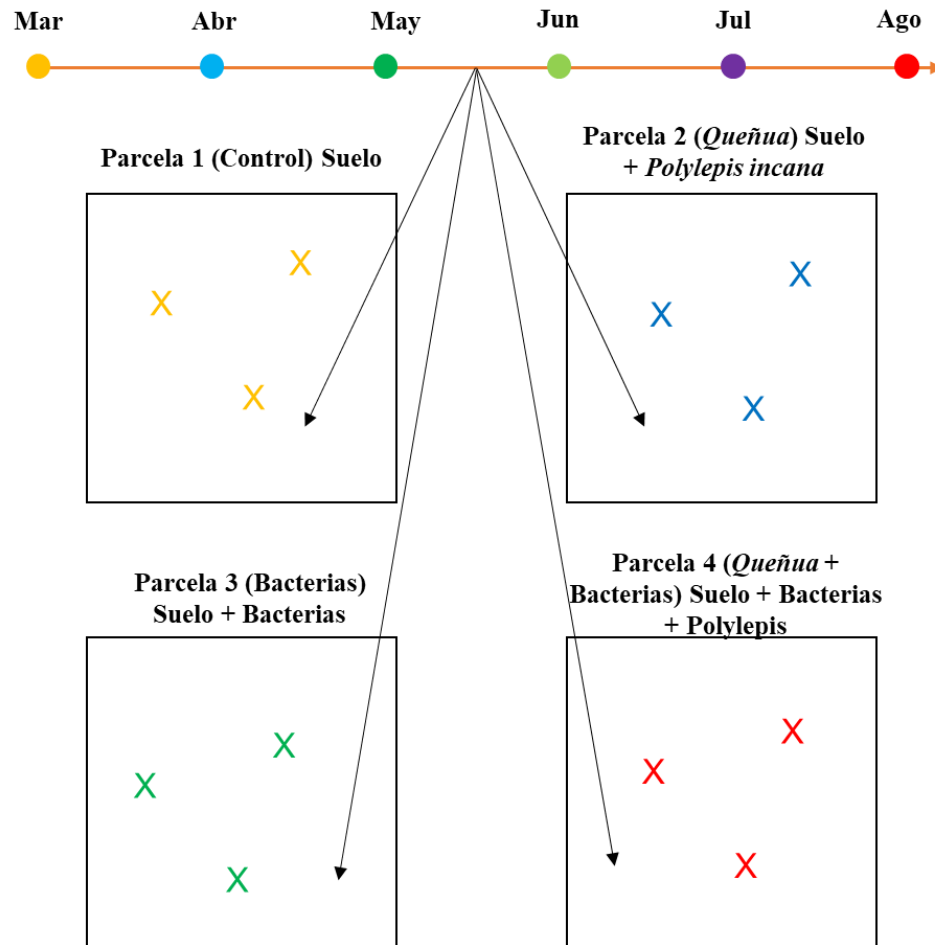
- Suelo sin intervención (control).
- Suelo + *Polylepis incana*.
- Suelo + bacterias.
- Suelo + bacterias + *Polylepis incana*.

El método experimental permite establecer relaciones causa–efecto y es ampliamente utilizado en investigaciones de suelos, ecología y ciencias ambientales.

3.5. Diseño de investigación

El estudio utilizó un diseño experimental de campo, con un arreglo factorial simple con mediciones repetidas en el tiempo. El diseño incluye cuatro tratamientos distribuidos en parcelas delimitadas, evaluadas en seis momentos (meses consecutivos, marzo–agosto 2025). Las mediciones repetidas permiten analizar la evolución temporal de cada variable y el efecto acumulado del tratamiento (Kuehl, 2001).

El esquema correspondiente al diseño factorial simple con mediciones repetidas presenta la siguiente estructura:



Donde:

- Cada parcela contiene tres submuestras permanentes (réplicas internas) por muestreo.
- Tratamientos: Control, *Queñua*, Bacterias, *Queñua* + Bacterias
- Análisis de variables: pH, C orgánico, P, N, K, CE, CIC, Cd, Na, Mg, Da.
- Análisis estadístico: ANOVA de medidas repetidas.

El diseño factorial permite:

- Comparar la eficacia de cada tratamiento.
- Evaluar la interacción entre *Polylepis incana* y bacterias.
- Analizar la tendencia de remediación a lo largo del tiempo.

3.6. Población, muestra y muestreo

3.6.1. Población

La población de estudio está conformada por los suelos impactados por cadmio en la zona de influencia de la mina Santa Bárbara, ubicada en Huancavelica. Esta área presenta antecedentes históricos de minería con acumulación de Cd y degradación edáfica.

3.6.2. Muestra

La muestra estuvo constituida por cuatro parcelas experimentales, cada una correspondiente a un tratamiento. Dentro de cada parcela se tomaron múltiples submuestras mensuales para obtener representatividad espacial y temporal.

Las parcelas fueron:

- Parcela 1: Suelo sin intervención.
- Parcela 2: Suelo + *Polylepis incana*.
- Parcela 3: Suelo + bacterias.
- Parcela 4: Suelo + bacterias + *Polylepis incana*.

3.6.3. Muestreo

Se aplicó un muestreo no probabilístico por conveniencia, debido a las características específicas del terreno y a la necesidad de instalar las parcelas en áreas homogéneas y previamente diagnosticadas como contaminadas.

Dentro de cada parcela se ejecutó un muestreo sistemático en puntos fijos, lo cual garantiza la replicabilidad de las mediciones a lo largo del tiempo (Kuehl, 2001).

3.7. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

a) Trabajo de campo

Para las labores propias de la técnica de trabajo de campo se han optado por las siguientes herramientas:

- Barrena de acero para extracción de suelo.
- Bolsas de muestreo y etiquetado para manejo de muestras.
- GPS para georreferenciación.
- Ficha de campo para registro de datos ambientales.

b) Análisis de laboratorio

Los análisis se efectuaron siguiendo protocolos estandarizados (Sparks, 2015):

Tabla 5*Protocolos estandarizados para la recolección de información*

Parámetro	Técnica	Instrumento
pH	Potenciometría (1:2.5)	pH-metro
Carbono orgánico	Digestión húmeda (Walkley-Black)	Sistema de digestión
Fosforo (P)	Método Olsen/Bray	Espectrofotómetro
Nitrógeno total (N)	Método Kjeldahl	Equipo Kjeldahl
Potasio (K), Na, Mg	Extracción + lectura	Fotómetro/ICP-OES
Conductividad eléctrica	Medición directa	Conductivímetro
CIC	Saturación catiónica	Titulación/espectrofotometría
Cadmio (Cd)	Digestión EPA 3050 + AAS	AAS o ICP-OES
Densidad aparente	Método del cilindro	Balanza + cilindro

Nota. Elaborado a partir de Sparks (2015).

3.8. Técnicas de procesamiento y análisis de datos

El procedimiento de análisis de datos ha proseguido sustancialmente tres fases:

a. Procesamiento inicial

- Codificación de muestras.
- Verificación de consistencia de datos.
- Conversión de unidades según criterios técnicos.

b. Estadística descriptiva

- Media, mediana, desviación estándar.
- Gráficos de tendencia temporal para cada parcela.

c. Estadística inferencial

- ANOVA de medidas repetidas, para comparar la evolución del Cd y demás parámetros entre parcelas a lo largo del tiempo.
- Correlaciones de Pearson o Spearman, para examinar relaciones entre propiedades del suelo y concentración de Cd.

Los softwares utilizados para el procesamiento estadístico de los datos fue mediante el Programa Estadístico Jamovi 2.6.44 y el programa estadístico Excel.

CAPÍTULO IV

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1. Análisis de información

4.1.1. Análisis Descriptivo de las variables (incluida Cd)

Los resultados obtenidos en la Tabla 6, Figura 4 y Figura 5 presentan información que abarca los seis meses de evaluación (marzo–agosto), muestran comportamientos diferenciados de las propiedades físico–químicas del suelo según el tratamiento aplicado. En el tratamiento solo suelo, los valores de pH se mantuvieron ligeramente ácidos a cercanos a la neutralidad (5,8–6,1), sin variaciones significativas en el contenido de carbono orgánico, la conductividad eléctrica ni la capacidad de intercambio catiónico. De manera consistente, la concentración de cadmio (Cd) permaneció constante en aproximadamente 21 mg/kg durante todo el periodo, evidenciando la ausencia de procesos naturales de reducción o inmovilización del metal en el suelo sin intervención biológica.

En el tratamiento suelo + *Polylepis incana* se observó una disminución progresiva del contenido de cadmio a lo largo del tiempo. Los valores descendieron de 19,7 mg/kg en marzo a 7,2 mg/kg en agosto, lo que representa una reducción sostenida del metal en comparación con el suelo sin tratamiento. El pH se mantuvo dentro de un rango ligeramente ácido, mientras que la CIC y la conductividad eléctrica no presentaron

cambios abruptos, lo que sugiere que la variación del Cd se asocia principalmente a la presencia y actividad de la especie vegetal.

El tratamiento suelo + bacterias mostró una reducción moderada del cadmio, pasando de 20,5 mg/kg en marzo a 17,4 mg/kg en agosto. Aunque la disminución fue menor en comparación con el tratamiento con *Polylepis incana*, los datos indican un efecto positivo de la actividad bacteriana sobre la inmovilización del metal. Las demás propiedades del suelo, como nutrientes y CIC, se mantuvieron relativamente estables durante el periodo de estudio.

Finalmente, el tratamiento suelo + *Polylepis incana* + bacterias presentó el comportamiento más destacado. La concentración de cadmio disminuyó de 19,4 mg/kg en marzo a 3,6 mg/kg en agosto, evidenciando una reducción marcada y progresiva. Este tratamiento también mostró ligeras mejoras en la densidad aparente y en el equilibrio de cationes, lo que sugiere una recuperación gradual de la funcionalidad del suelo bajo un enfoque integrado.

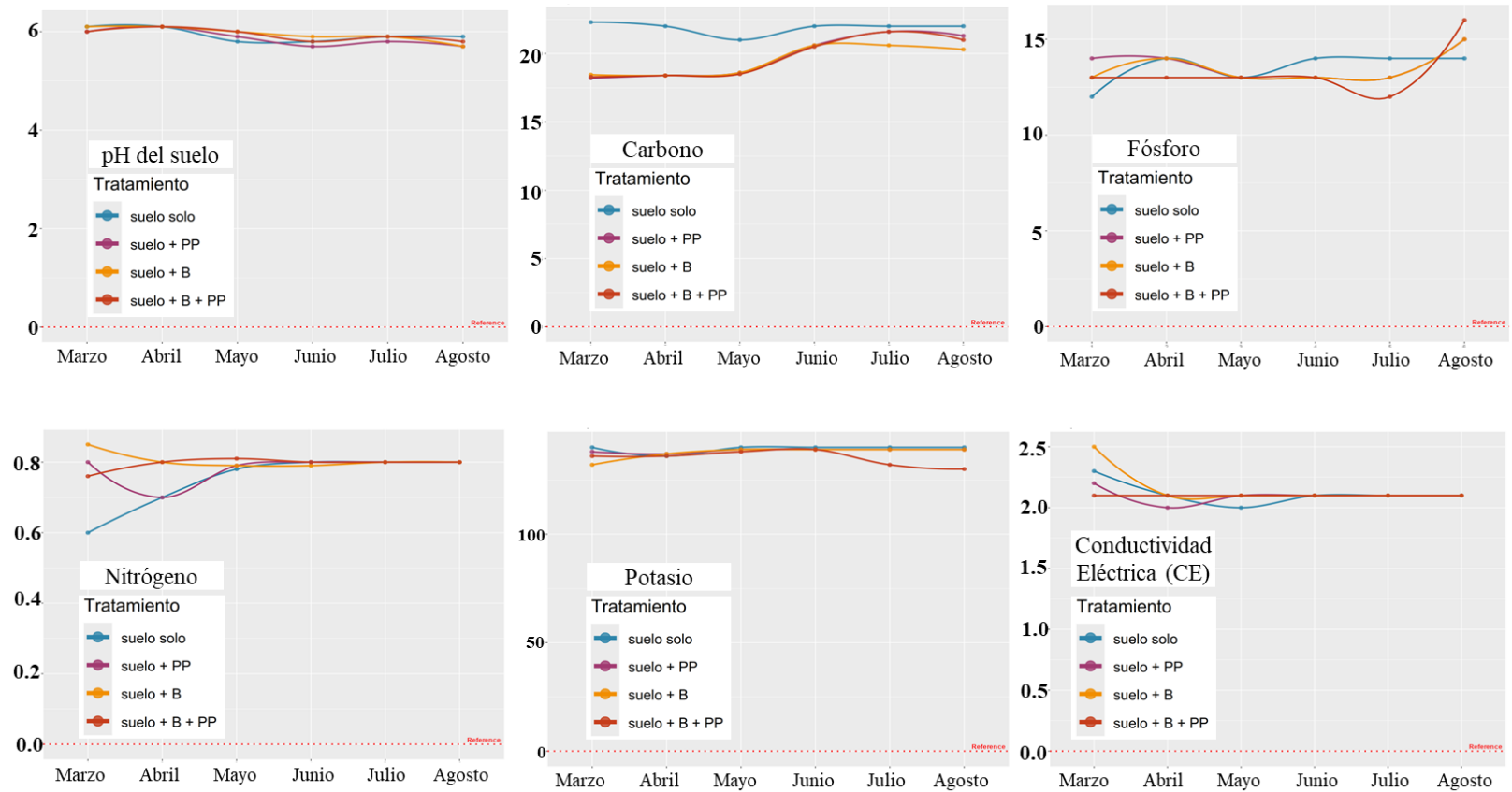
Tabla 6*Mediciones de propiedades físico-químicas de las parcelas de suelo y los tres tratamientos durante seis meses*

Tratamiento	Meses	ph	C	Fósforo	Nitrógeno	Potasio	CE	CIC	Cd	Na	Mg	Densidad
Solo suelo	Marzo	6.1	22.3	12	0.6	140	2.3	13.6	21	314	334	0.96
Suelo + PP	Marzo	6	18.2	14	0.8	138	2.2	13.8	19.7	320	320	1.2
Suelo + B	Marzo	6.1	18.45	13	0.85	132	2.5	13.7	20.5	324	324	1
Suelo + B + PP	Marzo	6	18.29	13	0.76	136	2.1	13.6	19.4	315	315	1.1
Solo suelo	Abril	6.1	22	14	0.7	136	2.1	13.3	21	319	336	0.92
Suelo + PP	Abril	6.1	18.4	14	0.7	137	2	13.3	17.2	320	340	1.1
Suelo + B	Abril	6.1	18.4	14	0.8	137	2.1	13.4	20.5	320	320	1.1
Suelo + B + PP	Abril	6.1	18.39	13	0.8	136	2.1	13.3	16.9	318	330	1.1
Solo suelo	Mayo	5.8	21	13	0.78	140	2	13.4	21	321	335	0.9
Suelo + PP	Mayo	5.9	18.6	13	0.79	139	2.1	13.3	15.4	320	340	1
Suelo + B	Mayo	6	18.6	13	0.79	139	2.1	13.4	19.7	320	340	1
Suelo + B + PP	Mayo	6	18.5	13	0.81	138	2.1	13.3	14.7	319	338	0.9
Solo suelo	Junio	5.8	22	14	0.8	140	2.1	13.5	21	335	340	0.78
Suelo + PP	Junio	5.7	20.6	13	0.8	139	2.1	13.5	13.1	320	341	1
Suelo + B	Junio	5.9	20.6	13	0.79	139	2.1	13.4	19	320	341	1
Suelo + B + PP	Junio	5.8	20.5	13	0.8	139	2.1	13.3	10.9	290	330	0.9
Solo suelo	Julio	5.9	22	14	0.8	140	2.1	13.6	21	335	340	0.8
Suelo + PP	Julio	5.8	21.6	13	0.8	139	2.1	13.5	11	321	340	1
Suelo + B	Julio	5.9	20.6	13	0.8	139	2.1	13.4	18.1	321	340	1
Suelo + B + PP	Julio	5.9	21.6	12	0.8	132	2.1	13.2	8.5	291	328	0.9
Solo suelo	Agosto	5.9	22	14	0.8	140	2.1	13.6	21	335	340	0.8
Suelo + PP	Agosto	5.7	21.3	15	0.8	139	2.1	13.6	7.2	321	340	1
Suelo + B	Agosto	5.7	20.3	15	0.8	139	2.1	13.3	17.4	320	340	1
Suelo + B + PP	Agosto	5.8	21	16	0.8	130	2.1	13.2	3.6	290	320	1

Nota. PP = *Polylepis incana*. B = Bacteria.

Figura 4

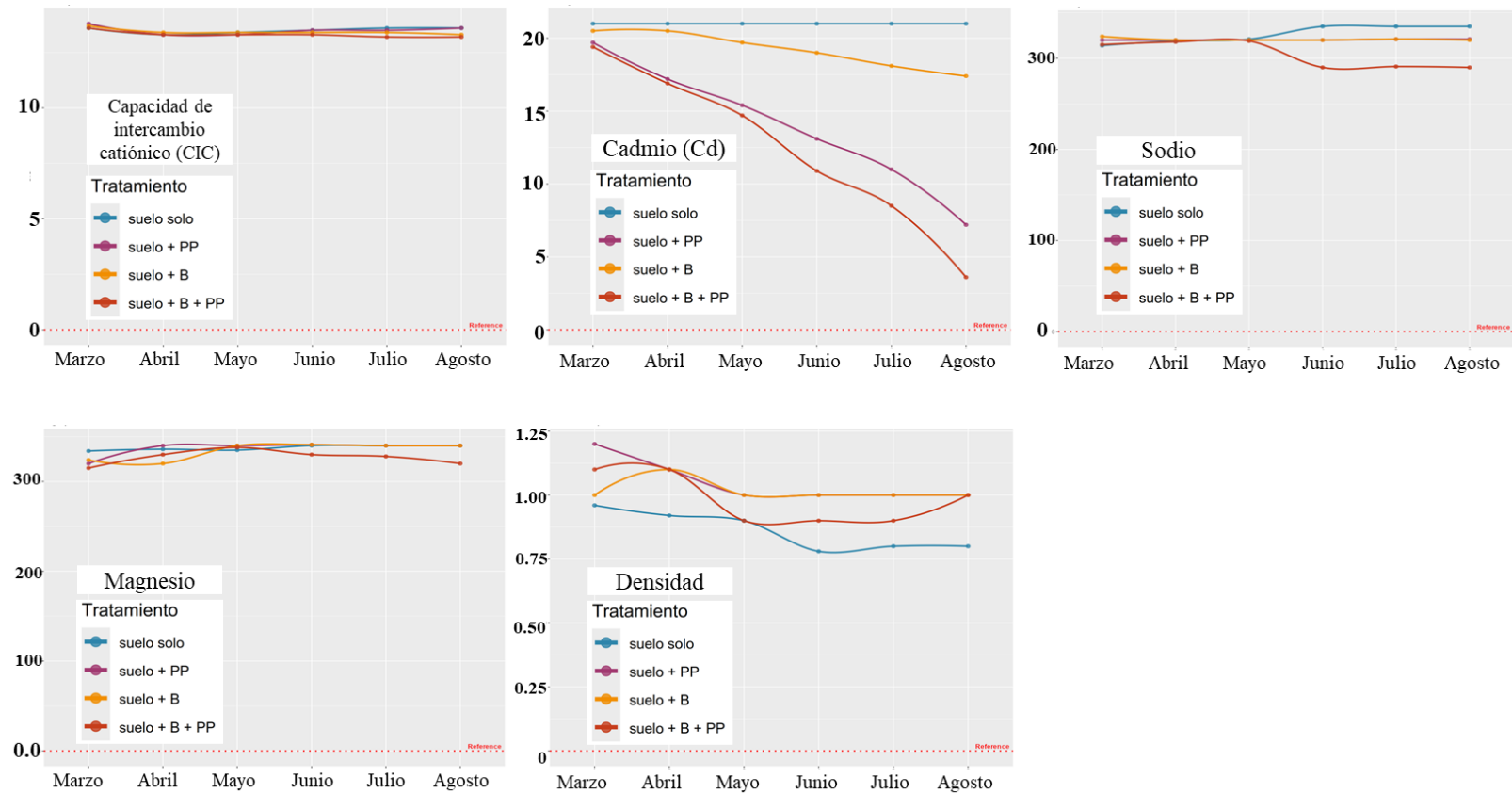
Gráfico de línea de los cambios del suelo en pH, Carbono, Fósforo, Nitrógeno, Potasio y CE, bajo cuatro condiciones



Nota. Las diferentes mediciones se han desarrollado bajo sus propias escalas numéricas (escala bruta).

Figura 5

Gráfico de línea de los cambios del suelo en Capacidad de intercambio catiónico, Cadmio, Sodio, Magnesio y densidad aparente, bajo cuatro condiciones



Nota. Las diferentes mediciones se han desarrollado bajo sus propias escalas numéricas (escala bruta).

4.1.2. Análisis comparativo de los cambios físico-químicos del suelo

El análisis comparativo a través de la Tabla 7 evidencia que no todas las propiedades físico-químicas del suelo responden de igual manera a los tratamientos aplicados, observándose efectos diferenciados según el tipo de intervención (planta, bacterias o combinación de ambas). En el caso del pH, los resultados del ANOVA indican que no existen diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos ($p > 0,05$), lo que demuestra que ninguno de los tratamientos alteró de forma sustancial la acidez del suelo. Esta estabilidad del pH resulta relevante, ya que permite interpretar que los cambios observados en otras variables, especialmente en el cadmio, no están mediados por modificaciones fuertes en la reacción del suelo, sino por procesos biológicos y fisicoquímicos más específicos.

En relación con el carbono orgánico, el análisis comparativo muestra diferencias significativas entre el tratamiento solo suelo y los tratamientos que incorporan *Polylepis incana* y/o bacterias. Las comparaciones post hoc indican que el suelo sin tratamiento presenta valores significativamente mayores en comparación con los suelos intervenidos, lo cual se explica por el consumo y transformación del carbono orgánico asociado a la actividad biológica vegetal y microbiana. No obstante, no se evidencian diferencias significativas entre los tratamientos suelo + PP, suelo + B y suelo + PP + B, lo que sugiere que la presencia de componentes biológicos genera un comportamiento similar del carbono orgánico a lo largo del tiempo.

Para los nutrientes fósforo y nitrógeno, el ANOVA no detecta diferencias significativas entre tratamientos ($p > 0,05$), lo que indica que las variaciones observadas durante los seis meses responden más a fluctuaciones temporales que a un efecto directo de las intervenciones. En contraste, el potasio sí presenta diferencias significativas ($p < 0,05$), particularmente entre el tratamiento solo suelo y el tratamiento combinado suelo +

PP + B, lo que sugiere que la interacción planta–bacteria influye en la dinámica de este nutriente, posiblemente por un mayor reciclaje y redistribución iónica en la rizósfera.

En cuanto a la conductividad eléctrica y la capacidad de intercambio catiónico (CIC), los análisis no muestran diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos. Esto indica que, a pesar de la incorporación de bacterias y plantas, la salinidad y la capacidad global del suelo para retener cationes se mantienen relativamente estables durante el periodo experimental. Esta estabilidad es relevante, ya que permite descartar que la reducción del cadmio se deba a cambios drásticos en la salinidad o en la CIC, reforzando la interpretación de mecanismos de inmovilización más específicos.

El cadmio (Cd) es la variable que presenta el efecto más claro y consistente de los tratamientos, con diferencias estadísticamente significativas entre condiciones ($F = 7.39$, $p = 0.002$). Las comparaciones post hoc muestran que el tratamiento suelo + PP + B difiere significativamente tanto del suelo solo como del suelo + bacterias, evidenciando la mayor reducción del metal. El tratamiento suelo + PP también presenta diferencias significativas respecto al suelo sin tratamiento, mientras que el tratamiento suelo + bacterias muestra un efecto más limitado. Este patrón confirma un efecto sinérgico entre la planta y las bacterias en la inmovilización del cadmio, coherente con los principios de la fitoestabilización asistida por microorganismos.

Respecto a los cationes sodio y magnesio, los resultados muestran diferencias significativas principalmente asociadas al tratamiento combinado suelo + PP + B, especialmente en sodio ($p = 0.002$). Estos cambios sugieren una reorganización del equilibrio catiónico del suelo bajo la influencia conjunta de raíces y microorganismos, lo cual puede favorecer indirectamente la retención del Cd mediante competencia iónica y formación de complejos en el sistema suelo–rizósfera.

Finalmente, la densidad aparente presenta diferencias estadísticamente significativas entre el suelo sin tratamiento y los tratamientos con intervención biológica ($p = 0.002$). Los valores más bajos de densidad aparente en los suelos con *Polylepis incana* y bacterias indican una mejora en la estructura del suelo, mayor porosidad y mejor acondicionamiento físico, factores que favorecen el desarrollo radicular, la actividad microbiana y los procesos de fitoestabilización.

En conjunto, el análisis comparativo demuestra que el tratamiento combinado suelo + *Polylepis incana* + bacterias es el que genera los cambios físico-químicos más favorables desde una perspectiva de remediación, destacando la reducción significativa del cadmio, la mejora en la estructura del suelo y la regulación del equilibrio catiónico. El tratamiento con *Polylepis incana* por sí solo presenta un efecto importante, mientras que el uso exclusivo de bacterias muestra un impacto más limitado. Estos resultados respaldan la eficacia de estrategias integradas suelo-planta-microorganismo para la remediación de suelos contaminados con cadmio en contextos mineros altoandinos.

Tabla 7
ANOVA de medidas repetidas para las cuatro condiciones de suelos durante seis meses

Comparación		Comparaciones Post Hoc - Tratamiento (ANOVA)*					Comparaciones Post Hoc - Tratamiento (ANOVA bayesiano)**			
Tratamiento	Tratamiento	Diferencia de Medias	EE	gl	t	p _{tukey}	Prior Odds	Posterior Odds	BF10,U	error%
pH										
suelo solo	- suelo + PP	0.0667	0.0832	20	0.802	0.853	0.414	0.233	0.563	0.00107
	- suelo + B	-0.0167	0.0832	20	-0.2	0.997	0.414	0.196	0.473	<.001
	- suelo + B + PP	<.001	0.0832	20	<.001	1	0.414	0.194	0.467	<.001
suelo + PP	- suelo + B	-0.0833	0.0832	20	-1.002	0.75	0.414	0.252	0.608	0.00137
	- suelo + B + PP	-0.0667	0.0832	20	-0.802	0.853	0.414	0.237	0.573	0.00114
suelo + B	- suelo + B + PP	0.0167	0.0832	20	0.2	0.997	0.414	0.196	0.474	<.001
Carbono orgánico										
suelo solo	- suelo + PP	2.1	0.711	20	2.9521	0.036	0.414	2.186	5.277	<.001
	- suelo + B	2.3917	0.711	20	3.3621	0.015	0.414	16.566	39.993	<.001
	- suelo + B + PP	2.17	0.711	20	3.0505	0.03	0.414	2.901	7.004	<.001
suelo + PP	- suelo + B	0.2917	0.711	20	0.41	0.976	0.414	0.202	0.489	<.001
	- suelo + B + PP	0.07	0.711	20	0.0984	1	0.414	0.194	0.468	<.001
suelo + B	- suelo + B + PP	-0.2217	0.711	20	-0.3116	0.989	0.414	0.199	0.48	<.001
Fósforo										
suelo solo	- suelo + PP	-0.167	0.573	20	-0.291	0.991	0.414	0.201	0.486	<.001
	- suelo + B	<.001	0.573	20	<.001	1	0.414	0.194	0.467	<.001
	- suelo + B + PP	0.167	0.573	20	0.291	0.991	0.414	0.198	0.477	<.001
suelo + PP	- suelo + B	0.167	0.573	20	0.291	0.991	0.414	0.201	0.486	<.001
	- suelo + B + PP	0.333	0.573	20	0.582	0.936	0.414	0.211	0.508	<.001

Comparación		Comparaciones Post Hoc - Tratamiento (ANOVA)*						Comparaciones Post Hoc - Tratamiento (ANOVA bayesiano)**			
Tratamiento	Tratamiento	Diferencia de Medias	EE	gl	t	p _{tukey}	Prior Odds	Posterior Odds	BF10,U	error%	
suelo + B	- suelo + B + PP	0.167	0.573	20	0.291	0.991	0.414	0.198	0.477	<.001	
Nitrógeno											
suelo solo	- suelo + PP	-0.035	0.0275	20	-1.271	0.591	0.414	0.256	0.617	0.00143	
	- suelo + B	-0.05833	0.0275	20	-2.118	0.182	0.414	0.445	1.074	0.0054	
	- suelo + B + PP	-0.04833	0.0275	20	-1.755	0.323	0.414	0.354	0.855	0.00286	
suelo + PP	- suelo + B	-0.02333	0.0275	20	-0.847	0.831	0.414	0.31	0.748	0.00228	
	- suelo + B + PP	-0.01333	0.0275	20	-0.484	0.962	0.414	0.231	0.557	0.00102	
suelo + B	- suelo + B + PP	0.01	0.0275	20	0.363	0.983	0.414	0.244	0.589	0.00124	
Potasio											
suelo solo	- suelo + PP	0.833	1.4	20	0.596	0.932	0.414	0.284	0.685	0.00186	
	- suelo + B	1.833	1.4	20	1.312	0.566	0.414	0.344	0.832	0.00274	
	- suelo + B + PP	4.167	1.4	20	2.982	0.034	0.414	1.19	2.874	0.00749	
suelo + PP	- suelo + B	1	1.4	20	0.716	0.89	0.414	0.241	0.583	0.0012	
	- suelo + B + PP	3.333	1.4	20	2.385	0.112	0.414	0.793	1.913	0.00575	
suelo + B	- suelo + B + PP	2.333	1.4	20	1.67	0.365	0.414	0.318	0.768	0.00241	
Conductividad eléctrica											
suelo solo	- suelo + PP	0.0167	0.058	20	0.287	0.991	0.414	0.201	0.486	<.001	
	- suelo + B	-0.05	0.058	20	-0.862	0.824	0.414	0.221	0.533	<.001	
	- suelo + B + PP	0.0167	0.058	20	0.287	0.991	0.414	0.205	0.494	<.001	
suelo + PP	- suelo + B	-0.0667	0.058	20	-1.15	0.664	0.414	0.254	0.614	0.00141	
	- suelo + B + PP	<.001	0.058	20	<.001	1	0.414	0.194	0.467	<.001	
suelo + B	- suelo + B + PP	0.0667	0.058	20	1.15	0.664	0.414	0.265	0.639	0.00157	

Comparación		Comparaciones Post Hoc - Tratamiento (ANOVA)*					Comparaciones Post Hoc - Tratamiento (ANOVA bayesiano)**			
Tratamiento	Tratamiento	Diferencia de Medias	EE	gl	t	p _{tukey}	Prior Odds	Posterior Odds	BF10,U	error%
Capacidad de intercambio catiónico										
suelo solo	- suelo + PP	<.001	0.0877	20	<.001	1	0.414	0.194	0.467	<.001
	- suelo + B	0.0667	0.0877	20	0.76	0.871	0.414	0.247	0.595	0.00129
	- suelo + B + PP	0.1833	0.0877	20	2.09	0.19	0.414	0.825	1.991	0.00364
suelo + PP	- suelo + B	0.0667	0.0877	20	0.76	0.871	0.414	0.226	0.546	<.001
	- suelo + B + PP	0.1833	0.0877	20	2.09	0.19	0.414	0.527	1.272	0.00424
suelo + B	- suelo + B + PP	0.1167	0.0877	20	1.33	0.555	0.414	0.356	0.859	0.00288
Cadmio										
suelo solo	- suelo + PP	7.07	2.15	20	3.282	0.018	0.414	4.897	11.824	0.00197
	- suelo + B	1.8	2.15	20	0.836	0.837	0.414	3.049	7.361	0.00128
	- suelo + B + PP	8.67	2.15	20	4.025	0.003	0.414	3.811	9.201	0.00184
suelo + PP	- suelo + B	-5.27	2.15	20	-2.446	0.1	0.414	1.355	3.272	0.00718
	- suelo + B + PP	1.6	2.15	20	0.743	0.879	0.414	0.212	0.512	<.001
suelo + B	- suelo + B + PP	6.87	2.15	20	3.189	0.022	0.414	1.447	3.494	0.01222
Sodio										
suelo solo	- suelo + PP	6.167	5.13	20	1.203	0.632	0.414	0.403	0.973	0.0041
	- suelo + B	5.667	5.13	20	1.1055	0.69	0.414	0.357	0.863	0.00291
	- suelo + B + PP	22.667	5.13	20	4.422	0.001	0.414	2.092	5.051	0.00107
suelo + PP	- suelo + B	-0.5	5.13	20	-0.0975	1	0.414	0.229	0.553	<.001
	- suelo + B + PP	16.5	5.13	20	3.2189	0.021	0.414	1.288	3.108	0.00628
suelo + B	- suelo + B + PP	17	5.13	20	3.3165	0.017	0.414	1.391	3.357	0.00851
Magnesio										
suelo solo	- suelo + PP	0.667	4.41	20	0.151	0.999	0.414	0.196	0.473	<.001

Comparación		Comparaciones Post Hoc - Tratamiento (ANOVA)*					Comparaciones Post Hoc - Tratamiento (ANOVA bayesiano)**			
Tratamiento	Tratamiento	Diferencia de Medias	EE	gl	t	p _{tukey}	Prior Odds	Posterior Odds	BF10,U	error%
suelo + PP	- suelo + B	3.333	4.41	20	0.756	0.873	0.414	0.24	0.579	0.00118
	- suelo + B + PP	10.667	4.41	20	2.42	0.105	0.414	1.833	4.425	0.00151
	- suelo + B	2.667	4.41	20	0.605	0.929	0.414	0.211	0.509	<.001
	- suelo + B + PP	10	4.41	20	2.268	0.139	0.414	0.667	1.611	0.01207
suelo + B	- suelo + B + PP	7.333	4.41	20	1.664	0.368	0.414	0.359	0.866	0.00293
Densidad aparente										
suelo solo	- suelo + PP	-0.19	0.0448	20	-4.24	0.002	0.414	6.708	16.196	<.001
	- suelo + B	-0.1567	0.0448	20	-3.496	0.011	0.414	9.969	24.068	<.001
	- suelo + B + PP	-0.1233	0.0448	20	-2.752	0.055	0.414	0.936	2.261	0.00634
suelo + PP	- suelo + B	0.0333	0.0448	20	0.744	0.878	0.414	0.247	0.595	0.00129
	- suelo + B + PP	0.0667	0.0448	20	1.488	0.463	0.414	0.316	0.762	0.00237
suelo + B	- suelo + B + PP	0.0333	0.0448	20	0.744	0.878	0.414	0.233	0.563	0.00107

Nota. * Corresponde al análisis estadístico frecuentista. ** Corresponde al análisis bayesiano. Para la variable pH ($F = 0.395$, $p = 0.758$, $\eta^2 p = 0.065$). Para la variable Carbono orgánico ($F = 4.93$, $p = 0.10$, $\eta^2 p = 0.425$). Para la variable Fósforo ($F = 0.113$, $p = 0.951$, $\eta^2 p = 0.017$). Para la variable Nitrógeno ($F = 1.71$, $p = 0.197$, $\eta^2 p = 0.204$). Para la variable Potasio ($F = 3.33$, $p = 0.040$, $\eta^2 p = 0.333$). Para la variable Conductividad Eléctrica ($F = 0.592$, $p = 0.627$, $\eta^2 p = 0.082$). Para la variable Potasio ($F = 3.33$, $p = 0.040$, $\eta^2 p = 0.333$). Para la variable Capacidad de Intercambio Catiónico ($F = 1.94$, $p = 0.155$, $\eta^2 p = 0.226$). Para la variable Cadmio ($F = 7.39$, $p = 0.002$, $\eta^2 p = 0.526$). Para la variable Sodio ($F = 7.27$, $p = 0.002$, $\eta^2 p = 0.521$). Para la variable Magnesio ($F = 2.45$, $p = 0.093$, $\eta^2 p = 0.269$). Para la variable Densidad aparente ($F = 6.85$, $p = 0.002$, $\eta^2 p = 0.507$).

4.1.3. Análisis comparativo solo con *Polylepis incana* y solo con Inoculación bacteriana

Los resultados de acuerdo con la Tabla 8 de la prueba t de Student indican que existen diferencias estadísticamente significativas en la concentración de cadmio (Cd) entre el suelo sin tratamiento y el suelo con *Polylepis incana* ($t = 3.86$, $gl = 10$, $p = 0.003$). Dado que el valor de p es menor al nivel de significancia establecido ($\alpha = 0.05$), se rechaza la hipótesis nula de igualdad de medias y se concluye que la presencia de *Polylepis incana* se asocia con una disminución significativa del Cd en el suelo. La diferencia de medias (7.07 mg/kg) evidencia que el efecto no solo es estadísticamente significativo, sino también relevante desde el punto de vista ambiental.

El tamaño del efecto, estimado mediante la d de Cohen ($d = 2.23$), indica un efecto extremadamente grande, lo que sugiere que la incorporación de *Polylepis incana* tiene un impacto sustancial en la reducción del cadmio. Este resultado es reforzado por el análisis bayesiano, donde el Factor de Bayes ($BF_{10} = 11.8$) proporciona evidencia fuerte a favor de la hipótesis alterna, es decir, los datos son aproximadamente 12 veces más probables bajo el supuesto de que *Polylepis incana* reduce el Cd que bajo la hipótesis de ausencia de efecto. La convergencia entre el enfoque frecuentista y bayesiano fortalece la inferencia estadística y confirma el rol de *Polylepis incana* como agente eficaz de fitoestabilización.

En la comparación entre el suelo sin tratamiento y el suelo con inoculación bacteriana, la prueba t de Student también mostró diferencias estadísticamente significativas en la concentración de Cd ($t = 3.46$, $gl = 10$, $p = 0.006$). Este resultado indica que la inoculación bacteriana contribuye a la reducción del cadmio en el suelo, aunque la magnitud de la diferencia de medias (1.8 mg/kg) es menor en comparación con la observada para *Polylepis incana*. Aun así, el efecto es consistente y estadísticamente confiable.

El tamaño del efecto calculado ($d = 2.00$) corresponde también a un efecto grande, lo que evidencia que la inoculación bacteriana tiene un impacto importante en la disminución del Cd. Desde el enfoque bayesiano, el Factor de Bayes ($BF_{10} = 7.36$) indica evidencia moderada a fuerte a favor de la hipótesis alterna, confirmando que los datos apoyan de manera consistente el efecto de la inoculación bacteriana frente al modelo nulo. Aunque la evidencia bayesiana es ligeramente menor que en el caso de *Polylepis incana*, sigue siendo suficiente para respaldar la relevancia del tratamiento bacteriano.

En conjunto, los resultados de la prueba t demuestran que tanto la incorporación de *Polylepis incana* como la inoculación bacteriana reducen significativamente la concentración de cadmio en el suelo, siendo el efecto de la planta más pronunciado que el de las bacterias cuando se analizan de forma aislada. La coincidencia entre los resultados frecuentistas (valores de p y tamaños del efecto) y bayesianos (factores de Bayes) aporta una evidencia robusta y complementaria, fortaleciendo la validez de las conclusiones. Estos hallazgos respaldan el enfoque de fitoestabilización asistida, donde la planta constituye el componente principal y la inoculación bacteriana actúa como un potenciador del proceso de remediación.

Tabla 8

Análisis comparativo de Cadmio (Cd) en suelo vs PP y suelo vs B

		Estadístico	±%	gl	p	Diferencia de medias	EE de la diferencia	Tamaño del Efecto
Cd - suelo vs PP	T de Student	3.86 ^a		10	0.003	7.07	1.83	La d de Cohen
	Factor de Bayes ₁₀	11.8	<.001					
Cd - suelo vs B	T de Student	3.46 ^a		10	0.006	1.8	0.52	La d de Cohen
	Factor de Bayes ₁₀	7.36	<.001					

Nota. H_a $\mu_{\text{suelo solo}} \neq \mu_{\text{suelo} + B}$

^a La prueba de Levene significativa ($p < 0.05$) sugiere que las varianzas no son iguales

4.1.4. Análisis relacional de Cd y variables edáficas

Según la Tabla 9 que presenta los resultados de la correlación parcial entre Cadmio y las variables edáficas. La matriz muestra que el pH del suelo no presenta una relación estadísticamente significativa con el cadmio ($r = 0,177$; $p = 0,419$). Este resultado indica que, dentro del rango ligeramente ácido a cercano a la neutralidad observado durante el estudio, el pH no fue un factor determinante en la variación del Cd. Esta ausencia de correlación sugiere que los procesos de reducción del cadmio no estuvieron mediados por cambios sustanciales en la reacción del suelo, sino por otros mecanismos físico-biológicos.

El carbono orgánico presenta una correlación positiva débil y no significativa con el Cd ($r = 0,242$; $p = 0,266$). Sin embargo, el carbono orgánico se correlaciona negativamente y de forma significativa con la densidad aparente ($r = -0,603$; $p = 0,002$) y con el nitrógeno ($r = -0,625$; $p = 0,001$), lo que indica que la dinámica de la materia orgánica está más relacionada con la estructura del suelo y la actividad biológica que con la movilidad directa del cadmio durante el periodo evaluado.

En cuanto a los nutrientes, el fósforo y el nitrógeno no muestran correlaciones significativas con el Cd ($p > 0,05$), lo que indica que estos macronutrientes no influyeron directamente en la retención o movilización del metal. En contraste, el potasio presenta una correlación positiva y significativa con el Cd ($r = 0,568$; $p = 0,005$), sugiriendo que ambos cationes pueden compartir patrones similares de distribución en el suelo o responder a procesos comunes de intercambio catiónico, especialmente en condiciones de intervención biológica.

La conductividad eléctrica (CE) no muestra asociación significativa con el cadmio ($r = -0,015$; $p = 0,944$), lo que descarta la salinidad como un factor relevante en la dinámica del Cd durante el experimento. Por su parte, la capacidad de intercambio

catiónico (CIC) presenta una correlación positiva moderada con el Cd, aunque no significativa ($r = 0,331$; $p = 0,123$), lo que sugiere que, si bien la CIC contribuye a la retención general de cationes, no fue un factor dominante en la variación del cadmio en este contexto específico.

Las correlaciones más fuertes del Cd se observan con los cationes sodio y magnesio. El sodio presenta una correlación positiva muy alta y altamente significativa con el Cd ($r = 0,765$; $p < 0,001$), mientras que el magnesio también muestra una correlación positiva significativa ($r = 0,420$; $p = 0,046$). Estas relaciones indican que el cadmio se asocia estrechamente con el equilibrio catiónico del suelo, posiblemente a través de mecanismos de competencia iónica, adsorción en sitios de intercambio y procesos de redistribución en la rizósfera bajo la influencia de plantas y microorganismos.

Finalmente, la densidad aparente presenta una correlación negativa y significativa con el Cd ($r = -0,426$; $p = 0,043$), lo que sugiere que a medida que el suelo mejora su estructura (menor compactación), disminuye la concentración del cadmio. Este resultado es consistente con los tratamientos que incorporan *Polylepis incana* y bacterias, los cuales favorecen la agregación del suelo, el aumento de la porosidad y la inmovilización del metal.

Tabla 9*Matriz de correlación parcial[★] entre Cadmio y las propiedades físico-químicas del suelo*

		Cd	ph	C	Fósforo	Nitrógeno	Potasio	CE	CIC	Na	Mg	Densidad
Cd	r	—										
	p-value	—										
ph	r	0.177	—									
	p-value	0.419	—									
C	r	0.242	-0.02	—								
	p-value	0.266	0.929	—								
Fósforo	r	-0.036	0.027	-0.219	—							
	p-value	0.872	0.904	0.316	—							
Nitrógeno	r	-0.052	-0.158	-0.625**	0.04	—						
	p-value	0.813	0.473	0.001	0.856	—						
Potasio	r	0.568**	-0.295	0.192	-0.228	-0.235	—					
	p-value	0.005	0.172	0.38	0.296	0.281	—					
CE	r	-0.015	0.075	0.149	-0.055	0.194	-0.292	—				
	p-value	0.944	0.734	0.498	0.803	0.376	0.176	—				
CIC	r	0.331	-0.221	0.203	0.083	0.139	0.329	0.477*	—			
	p-value	0.123	0.311	0.353	0.706	0.527	0.125	0.021	—			
Na	r	0.765***	0.05	0.072	0.109	0.094	0.592**	0.021	0.540**	—		
	p-value	<.001	0.822	0.743	0.619	0.668	0.003	0.925	0.008	—		
Mg	r	0.420*	-0.013	0.2	-0.321	-0.314	0.671***	-0.175	-0.023	0.555**	—	
	p-value	0.046	0.952	0.361	0.136	0.145	<.001	0.423	0.918	0.006	—	
Densidad	r	-0.426*	-0.081	-0.603**	0.323	0.164	-0.234	-0.112	-0.036	-0.243	-0.33	—
	p-value	0.043	0.714	0.002	0.133	0.454	0.283	0.612	0.871	0.264	0.124	—

Nota. : * p < .05, ** p < .01, *** p < .001. ★ En el proceso de análisis de correlación parcial, se ha controlado la variable mes.

4.2. Proceso de prueba de hipótesis

4.2.1. Hipótesis general

- Hipótesis alterna: La incorporación de *Polylepis incana* (queñua) reduce la concentración de Cd en comparación con parcelas sin *queñua* durante el periodo de estudio.

$$\mu_{\text{suelo}} \neq \mu_{\text{suelo}+PP} \neq \mu_{\text{suelo}+B} \neq \mu_{\text{suelo}+PP+B}$$

- Hipótesis nula: La incorporación de *Polylepis incana* (queñua) no reduce significativamente la concentración de Cd y mejora indicadores de calidad del suelo en comparación con parcelas sin *queñua* durante el periodo de estudio.

$$\mu_{\text{suelo}} = \mu_{\text{suelo}+PP} = \mu_{\text{suelo}+B} = \mu_{\text{suelo}+PP+B}$$

- Nivel de significancia: $\alpha = 0.05$
- Estadístico de prueba: ANOVA, p-valor
- Resultados y conclusión:

Se halló $F=7.39$; $p=0.002$ (Tabla 7). Dado que el valor de p es menor que el nivel de significancia establecido ($p < 0.05$), se rechaza la hipótesis nula. Los análisis comparativos posteriores evidenciaron que el tratamiento suelo + *Polylepis incana* + bacterias presentó la mayor reducción del Cd, seguido por el tratamiento suelo + *Polylepis incana*, mientras que el tratamiento solo suelo no mostró cambios relevantes.

Con un nivel de significancia del 5%, los resultados del análisis de varianza (ANOVA) permitieron rechazar la hipótesis nula (H_0) y aceptar la hipótesis alterna (H_1), evidenciando diferencias estadísticamente significativas en la concentración de cadmio (Cd) entre los tratamientos evaluados ($F = 7.39$; $p = 0.002$). En particular, los tratamientos que incorporan *Polylepis incana*, especialmente en combinación con

bacterias, mostraron una reducción significativa del Cd en comparación con el suelo sin intervención. Este resultado confirma que la incorporación de la *queñua* influye de manera efectiva en la dinámica del cadmio durante el periodo de estudio.

De manera complementaria, el análisis desde el enfoque bayesiano aportó evidencia adicional a favor de la hipótesis alterna. Los valores del factor de Bayes (BF_{10}) obtenidos para la variable cadmio indicaron evidencia moderada a fuerte a favor del modelo con efecto de tratamiento, lo que implica que los datos observados son sustancialmente más probables bajo el supuesto de que existen diferencias reales entre los tratamientos, en comparación con el modelo nulo. A diferencia del enfoque frecuentista, que se basa en la probabilidad de observar los datos dado que la hipótesis nula es verdadera, la estadística bayesiana permite cuantificar directamente la fuerza de la evidencia a favor de la hipótesis de investigación, reforzando la interpretación de los resultados.

4.2.2. Hipótesis específicas

Hipótesis específica 1

- Hipótesis alterna: Las parcelas solo con *queñua* (parcela 2) tendrán una reducción de Cd a lo largo de los seis meses comparadas con la parcela 1 (suelo solo).

$$\mu_{\text{suelo}} \neq \mu_{\text{suelo}+PP}$$

- Hipótesis nula: Las parcelas solo con *queñua* (parcela 2) no tendrán una reducción de Cd a lo largo de los seis meses comparadas con la parcela 1 (suelo solo).

$$\mu_{\text{suelo}} = \mu_{\text{suelo}+PP}$$

- Nivel de significancia: $\alpha = 0.05$
- Estadístico de prueba: t de Student, p-valor
- Resultados y conclusión:

Los resultados de la prueba t de Student indican que existen diferencias estadísticamente significativas entre ambas parcelas en relación con la concentración de cadmio: $t = 3.86$; $gl = 10$; $p = 0.003$.

Dado que el valor de p es menor que el nivel de significancia establecido ($p < 0.05$), se rechaza la hipótesis nula. La diferencia de medias observada (≈ 7.07 mg/kg) muestra que la parcela con *Polylepis incana* presenta una menor concentración de cadmio en comparación con la parcela sin tratamiento, evidenciando una reducción sostenida del metal durante el periodo de estudio.

Desde el enfoque bayesiano, el análisis reportó un Factor de Bayes $BF_{10} = 11.8$, lo que constituye evidencia fuerte a favor de la hipótesis alterna. Este resultado indica que los datos observados son aproximadamente 12 veces más probables bajo el supuesto de que *Polylepis incana* reduce la concentración de Cd, que bajo el modelo de ausencia de efecto.

Con un nivel de significancia del 5 %, se rechaza la hipótesis nula (H_0) y se acepta la hipótesis alterna (H_1). Los resultados de la prueba t de Student demuestran que las parcelas con *Polylepis incana* presentan una reducción significativa de la concentración de cadmio en comparación con las parcelas de suelo sin intervención a lo largo de los seis meses de evaluación.

El análisis bayesiano complementa y refuerza esta conclusión al aportar evidencia fuerte sobre la consistencia del efecto observado, confirmando que *Polylepis incana* actúa como un agente eficaz de fitoestabilización en suelos contaminados con cadmio. La convergencia entre ambos enfoques estadísticos fortalece la validez de la inferencia y respalda el uso de esta especie nativa en estrategias de remediación de suelos mineros altoandinos.

Hipótesis específica 2

- Hipótesis alterna: Las parcelas solo con inoculación bacteriana (parcela 3) tendrán una reducción de Cd a lo largo de los seis meses comparadas con la parcela 1 (suelo solo).

$$\mu_{suelo} \neq \mu_{suelo+PP}$$

- Hipótesis nula: Las parcelas solo con inoculación bacteriana (parcela 3) no tendrán una reducción de Cd a lo largo de los seis meses comparadas con la parcela 1 (suelo solo).

$$\mu_{suelo} = \mu_{suelo+PP}$$

- Nivel de significancia: $\alpha = 0.05$
- Estadístico de prueba: t de Student, p-valor
- Resultados y conclusión:

Los resultados de la prueba t de Student evidenciaron diferencias estadísticamente significativas entre ambos tratamientos: $t = 3.46$; $gl = 10$; $p = 0.006$.

Dado que el valor de p es menor que el nivel de significancia establecido ($p < 0.05$), se rechaza la hipótesis nula. La diferencia de medias observada (≈ 1.80 mg/kg) indica que la parcela con inoculación bacteriana presenta una menor concentración de cadmio en comparación con el suelo sin tratamiento, evidenciando una disminución progresiva del metal durante el periodo de estudio.

Desde el enfoque bayesiano, el análisis reportó un Factor de Bayes $BF_{10} = 7.36$, lo que constituye evidencia moderada a fuerte a favor de la hipótesis alterna. Esto indica que los datos observados son más de siete veces más probables bajo el supuesto de que la inoculación bacteriana reduce la concentración de Cd que bajo la hipótesis de ausencia de efecto.

Con un nivel de significancia del 5 %, se rechaza la hipótesis nula (H_0) y se acepta la hipótesis alterna (H_1). Los resultados de la prueba t de Student demuestran que las

parcelas con inoculación bacteriana presentan una reducción estadísticamente significativa de la concentración de cadmio en comparación con las parcelas de suelo sin intervención a lo largo de los seis meses de evaluación.

El análisis bayesiano refuerza esta conclusión al proporcionar evidencia adicional sobre la consistencia y dirección del efecto bacteriano, confirmando que la inoculación bacteriana constituye un componente relevante en los procesos de biorremediación del cadmio. No obstante, en comparación con *Polylepis incana*, el efecto de las bacterias cuando actúan de manera aislada es de menor magnitud, lo que sugiere que su mayor potencial se manifiesta cuando interactúan con la planta en estrategias integradas de fitoestabilización.

Hipótesis específica 3

- Hipótesis alterna: La presencia de Cd se correlaciona con las propiedades físico-químicas de los suelos a lo largo de los seis meses.

$$\rho_{xy} \neq 0$$

- Hipótesis nula: La presencia de Cd no se correlaciona con las propiedades físico-químicas de los suelos a lo largo de los seis meses.

$$\rho_{xy} = 0$$

- Nivel de significancia: $\alpha = 0.05$
- Estadístico de prueba: r de Pearson, p-valor
- Resultados y conclusión:

Los resultados de la matriz de correlación parcial evidencian que la concentración de cadmio (Cd) presenta correlaciones estadísticamente significativas con varias propiedades físico-químicas del suelo. En particular, se identificaron correlaciones positivas fuertes y altamente significativas entre el Cd y el sodio (Na) ($r = 0.765$; $p < .001$), el potasio (K) ($r = 0.568$; $p = .005$) y el magnesio (Mg) ($r = 0.420$; $p = .046$),

lo que indica que mayores concentraciones de estos cationes se asocian con mayores niveles de cadmio en el suelo. Estas relaciones sugieren una mayor movilidad o persistencia del Cd en suelos con elevada carga catiónica intercambiable.

Asimismo, se observaron correlaciones negativas significativas entre el Cd y la densidad aparente del suelo ($r = -0.426$; $p = .043$), lo que indica que suelos menos compactos presentan mayores concentraciones de Cd, posiblemente debido a una mayor porosidad y disponibilidad del metal. En contraste, no se encontraron correlaciones estadísticamente significativas entre el Cd y variables como el pH, el carbono orgánico, el fósforo, el nitrógeno, la conductividad eléctrica (CE) y la capacidad de intercambio catiónico (CIC) ($p > .05$), lo que sugiere que, en el contexto del presente estudio, estas propiedades no explican de manera directa la variabilidad del Cd cuando se controla el efecto temporal.

Con un nivel de significancia del 5 %, se rechaza parcialmente la hipótesis nula (H_0) y se acepta la hipótesis alterna (H_1). Los resultados del coeficiente de correlación de Pearson demuestran que la concentración de cadmio (Cd) se correlaciona de manera significativa con determinadas propiedades físico-químicas del suelo, especialmente con cationes intercambiables como sodio, potasio y magnesio, así como con la densidad aparente del suelo.

Estos hallazgos indican que la dinámica del Cd en el suelo está fuertemente influenciada por variables asociadas al complejo de intercambio catiónico y a la estructura física del suelo, más que por variables químicas generales como el pH o la materia orgánica. En consecuencia, los resultados resaltan la importancia de considerar estas propiedades edáficas en el diseño y evaluación de estrategias de remediación, particularmente en procesos de fitoestabilización y biorremediación en suelos impactados por actividades mineras.

4.3. Discusión de resultados

Los resultados de la presente investigación evidencian que la aplicación de tratamientos biológicos y vegetales influye de manera diferenciada en las propiedades físico-químicas del suelo y, de forma particular, en la dinámica del cadmio (Cd) en suelos impactados por actividad minera. En concordancia con los antecedentes internacionales y nacionales, el suelo sin tratamiento mostró una estabilidad casi absoluta en la concentración de Cd a lo largo de los seis meses de evaluación, lo que confirma la alta persistencia y baja atenuación natural de este metal en ambientes edáficos degradados. Este comportamiento coincide con lo reportado por Pan et al. (2019) y Cruzado-Tafur et al. (2021), quienes señalan que, en ausencia de intervenciones biológicas, los metales pesados permanecen mayoritariamente en fracciones de baja movilidad, sin reducción significativa de su concentración total.

Los resultados obtenidos mediante la prueba *t* de Student complementan y refuerzan los hallazgos del análisis de varianza y del enfoque bayesiano, al evidenciar diferencias estadísticamente significativas en la concentración de cadmio entre tratamientos específicos. En particular, la comparación entre el suelo sin tratamiento y el suelo con *Polylepis incana* mostró una reducción significativa del Cd ($t = 3.86$; $p = 0.003$), con un tamaño del efecto extremadamente grande ($d = 2.23$) y evidencia bayesiana fuerte a favor de la hipótesis alterna ($BF_{10} = 11.8$), lo que confirma el rol de la queñua como agente eficaz de fitoestabilización. De manera similar, la comparación entre el suelo sin tratamiento y el suelo con inoculación bacteriana también evidenció una disminución significativa del Cd ($t = 3.46$; $p = 0.006$), acompañada de un tamaño del efecto grande ($d = 2.00$) y evidencia bayesiana moderada a fuerte ($BF_{10} = 7.36$), lo que respalda la contribución de las bacterias en los procesos de biorremediación. En conjunto, estos resultados confirman que tanto la intervención vegetal como la bacteriana reducen significativamente la concentración de cadmio en el suelo, aunque el efecto de *Polylepis incana* resulta más pronunciado cuando actúa de forma aislada, y alcanza su máxima

eficacia cuando se integra con la inoculación bacteriana, tal como se evidenció en los análisis comparativos globales.

El tratamiento con *Polylepis incana* evidenció una disminución progresiva del cadmio en el suelo, lo que respalda el potencial de esta especie como agente de fitoestabilización más que de fitoextracción. Este resultado es coherente con estudios realizados en ecosistemas altoandinos, donde diversas especies nativas muestran una mayor capacidad para inmovilizar metales en la rizósfera y en las fracciones radiculares, reduciendo su biodisponibilidad sin necesariamente acumularlos en grandes concentraciones en los tejidos aéreos (Chang-Kee et al., 2018; Narvaez-Ttito, 2024). A diferencia de especies arbóreas multipropósito evaluadas por Kaur et al. (2017), orientadas principalmente a la fitoextracción, *Polylepis incana* destaca por su adaptación a suelos pobres, su sistema radicular denso y su rol estabilizador del suelo, aspectos clave en contextos mineros altoandinos.

Por otro lado, el tratamiento con bacterias mostró una reducción moderada del Cd, lo que sugiere que la actividad microbiana contribuye parcialmente a la inmovilización del metal mediante procesos como la biosorción, la complejación y la precipitación. Este hallazgo concuerda con lo señalado por Jebara et al. (2019), quienes destacan que las bacterias promotoras del crecimiento vegetal resistentes al Cd pueden modificar su biodisponibilidad en el suelo, aunque su efecto suele ser limitado cuando no existe una interacción directa con las raíces de una planta hospedera. En este sentido, los resultados refuerzan la idea de que la biorremediación microbiana aislada presenta alcances restringidos frente a contaminaciones metálicas complejas.

El tratamiento combinado suelo + *Polylepis incana* + bacterias fue el que presentó la mayor reducción del cadmio, así como mejoras graduales en la estructura del suelo y en el equilibrio catiónico. Este comportamiento evidencia una interacción sinérgica suelo–planta–microorganismo, en la cual la rizósfera actúa como un microambiente clave para

la inmovilización del Cd. Estos resultados son consistentes con investigaciones recientes que resaltan la eficacia de estrategias integradas de fitorremediación asistida por microorganismos y enmiendas orgánicas, como las reportadas por Virú-Vásquez et al. (2025) y Rivera-Peña et al. (2024), quienes demostraron que la combinación de componentes biológicos potencia la estabilización de metales y mejora la calidad del suelo.

El análisis comparativo y correlacional refuerza esta interpretación, ya que el Cd mostró asociaciones significativas con variables relacionadas al equilibrio catiónico (Na y Mg) y a la densidad aparente del suelo, mientras que no presentó relaciones significativas con el pH, la conductividad eléctrica ni los macronutrientes. Este patrón sugiere que la reducción del Cd no responde a cambios químicos drásticos del suelo, sino a procesos estructurales y biológicos, como la mejora de la agregación del suelo, la competencia iónica y la acción conjunta de raíces y microorganismos. Hallazgos similares han sido reportados por Romero-Arribasplata y Bravo-Thais (2021), quienes señalaron que la eficiencia de la fitorremediación depende más de las interacciones edáficas y biológicas que de variaciones aisladas del pH.

De este modo, los resultados de esta investigación amplían el conocimiento sobre el uso de especies nativas altoandinas en la remediación de suelos contaminados con cadmio, aportando evidencia empírica sobre la eficacia de *Polylepis incana* en combinación con bacterias. A diferencia de estudios centrados en cultivos agrícolas o especies herbáceas, este trabajo resalta la importancia de integrar criterios ecológicos y de restauración ambiental, especialmente en contextos altoandinos como el de la mina Santa Bárbara. No obstante, los resultados deben interpretarse considerando el periodo de evaluación de seis meses y las condiciones controladas del experimento, por lo que futuras investigaciones podrían ampliar el tiempo de estudio y evaluar la estabilidad a largo plazo del cadmio inmovilizado.

Conclusiones

- a) La incorporación de *Polylepis incana* (queñua) tuvo un efecto estadísticamente significativo en la remediación de suelos impactados por cadmio (Cd) en la mina de Santa Bárbara durante el periodo marzo–agosto de 2025. El análisis de varianza (ANOVA) mostró diferencias significativas entre los tratamientos evaluados ($F = 7.39$; $p = 0.002$), lo que evidencia que al menos una de las intervenciones aplicadas modifica la concentración de Cd en el suelo. Este resultado fue reforzado por el análisis bayesiano, el cual indicó evidencia moderada a fuerte a favor del modelo con efecto de tratamiento ($BF_{10} > 3$). En conjunto, los análisis confirman que los tratamientos con intervención vegetal y microbiana reducen de manera significativa la concentración de Cd, siendo el tratamiento combinado (suelo + PP + B) el que presenta la mayor eficiencia de remediación.
- b) Las parcelas con solo *Polylepis incana* (parcela 2) presentaron una reducción estadísticamente significativa del Cd en comparación con el suelo sin intervención (parcela 1). La prueba t de Student evidenció diferencias significativas entre ambos tratamientos ($t = 3.86$; $gl = 10$; $p = 0.003$), con un tamaño del efecto extremadamente grande ($d = 2.23$). Asimismo, el análisis bayesiano mostró evidencia fuerte a favor de la hipótesis alterna ($BF_{10} = 11.8$), indicando que los datos son aproximadamente 12 veces más probables bajo el supuesto de que *Polylepis incana* reduce el Cd que bajo el modelo nulo. Estos resultados confirman el rol de la queñua como agente eficaz de fitoestabilización.
- c) Las parcelas con inoculación bacteriana (parcela 3) también mostraron una disminución significativa del Cd en comparación con el suelo sin tratamiento. La prueba t reveló diferencias estadísticamente significativas ($t = 3.46$; $gl = 10$; $p = 0.006$), acompañadas de un tamaño del efecto grande ($d = 2.00$). Desde el enfoque bayesiano, el factor de Bayes indicó evidencia moderada a fuerte a favor de la hipótesis alterna ($BF_{10} = 7.36$), lo que confirma que la inoculación bacteriana contribuye de manera efectiva a la reducción del Cd. Sin embargo, la magnitud del

efecto fue menor que la observada en las parcelas con *Polylepis incana*, lo que sugiere que su mayor potencial se manifiesta en combinación con la planta.

- d) El análisis correlacional mediante el coeficiente r de Pearson evidenció que la concentración de cadmio se correlaciona significativamente con determinadas propiedades físico-químicas del suelo. Se observaron correlaciones positivas significativas entre el Cd y el sodio ($r = 0.765$; $p < 0.001$), el potasio ($r = 0.568$; $p = 0.005$) y el magnesio ($r = 0.420$; $p = 0.046$), así como una correlación negativa significativa con la densidad aparente ($r = -0.426$; $p = 0.043$). Estos resultados indican que la dinámica del Cd está influenciada por el complejo de intercambio catiónico y por las características físicas del suelo, confirmando que las propiedades edáficas desempeñan un papel determinante en la movilidad y persistencia del metal.

Recomendaciones

- a) Se recomienda profundizar en investigaciones aplicadas sobre fitoestabilización y biorremediación en suelos contaminados por metales pesados, incorporando especies nativas altoandinas como *Polylepis incana*. Asimismo, se sugiere integrar enfoques estadísticos complementarios (frecuentistas y bayesianos) en futuros estudios, a fin de fortalecer la interpretación de resultados y contribuir al desarrollo de soluciones ambientalmente sostenibles y contextualizadas a la realidad de Huancavelica.
- b) Se recomienda ampliar esta línea de investigación mediante estudios de mayor duración y con diseños experimentales más complejos, que incluyan análisis de bioacumulación vegetal, dinámica microbiana y fraccionamiento químico del cadmio en el suelo. Además, se sugiere promover investigaciones interdisciplinarias que integren aspectos ecológicos, edáficos y socioambientales, con el objetivo de consolidar modelos de remediación adaptados a ecosistemas mineros altoandinos.
- c) Se recomienda considerar la incorporación de estrategias de remediación basadas en el uso de *Polylepis incana* y microorganismos benéficos dentro de los programas de recuperación de suelos degradados por actividades mineras. Los resultados de esta investigación evidencian que estas prácticas representan alternativas ecológicas, de bajo costo y ambientalmente viables para la reducción del cadmio, contribuyendo a la restauración progresiva de la calidad del suelo.
- d) Se recomienda fomentar la conservación y reforestación con especies nativas como la *queñua* (*Polylepis incana*), reconociendo su importancia no solo ecológica sino también ambiental y sanitaria. La participación comunitaria en acciones de recuperación de suelos degradados puede contribuir a la mejora de la calidad ambiental, a la protección de los recursos naturales y a la reducción de riesgos asociados a la contaminación por metales pesados en zonas de influencia minera.

Referencias bibliográficas

- Acharte, L., Enríquez, A., Quispealaya, L., & Asto, J. (2023). *Eficiencia de bioadsorción de vegetales silvestres sometidos a metales y metaloides contenidos en agua superficial* (1.^a ed.). Instituto Universitario de Innovación Ciencia y Tecnología Inudi Perú. <https://doi.org/10.35622/inudi.b.120>
- Alloway, B. J. (Ed.). (2013). *Heavy Metals in Soils: Trace Metals and Metalloids in Soils and their Bioavailability* (Vol. 22). Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-4470-7>
- Babu, S. M. O. F., Hossain, M. B., Rahman, M. S., Rahman, M., Ahmed, A. S. S., Hasan, Md. M., Rakib, A., Emran, T. B., Xiao, J., & Simal-Gandara, J. (2021). Phytoremediation of Toxic Metals: A Sustainable Green Solution for Clean Environment. *Applied Sciences*, 11(21), 10348. <https://doi.org/10.3390/app112110348>
- Barea, J. M., Palenzuela, J., Cornejo, P., Sánchez-Castro, I., Navarro-Fernández, C., López-García, A., Estrada, B., Azcón, R., Ferrol, N., & Azcón-Aguilar, C. (2011). Ecological and functional roles of mycorrhizas in semi-arid ecosystems of Southeast Spain. *Journal of Arid Environments*, 75(12), 1292-1301. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2011.06.001>
- Beltrán, M. L., & Gómez, L. M. (2015). Metales pesados (Cd, Cr y Hg): Su impacto en el ambiente y posibles estrategias biotecnológicas para su remediación. *Innovación, Investigación e Ingeniería (Universidad de Boyacá, Colombia)*, 0(2), 82-112.
- BIOEM. (2025). *EM•COMPOST®*. EM•COMPOST®. <https://www.bioem.com.pe/emcompost.html>
- Brady, N., & Weil, R. (2008). *The nature and properties of soils* (14th ed. revised). Pearson Prentice Hall.
- Campbell, D., & Stanley, J. (1995). *Diseños experimentales y cuasiexperimentales de la investigación social*. Amorrortu Editores.

- Chang-Kee, J., Gonzales, M. J., Ponce, O., Ramírez, L., León, V., Torres, A., Corpus, M., & Loayza-Muro, R. (2018). Accumulation of heavy metals in native Andean plants: Potential tools for soil phytoremediation in Ancash (Peru). *Environmental Science and Pollution Research*, 25(34), 33957-33966. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3325-z>
- Cierjacks, A., Rühr, N. K., Wesche, K., & Hensen, I. (2007). Effects of altitude and livestock on the regeneration of two tree line forming *Polylepis* species in Ecuador. *Plant Ecology*, 194(2), 207-221. <https://doi.org/10.1007/s11258-007-9285-x>
- Cruzado-Tafur, E., Bierla, K., Torró, L., & Szpunar, J. (2021). Accumulation of As, Ag, Cd, Cu, Pb, and Zn by Native Plants Growing in Soils Contaminated by Mining Environmental Liabilities in the Peruvian Andes. *Plants*, 10(2), 241. <https://doi.org/10.3390/plants10020241>
- Doran, J., & Zeiss, M. (2000). Soil health and sustainability: Managing the biotic component of soil quality. *Agronomy & Horticulture -- Faculty Publications*, 0(15), 3-11.
- Gadd, G. M. (2010). Metals, minerals and microbes: Geomicrobiology and bioremediation. *Microbiology (Reading, England)*, 156(Pt 3), 609-643. <https://doi.org/10.1099/mic.0.037143-0>
- Hair, J. F., Andereson, R. E., Tatham, R. L., & Black, W. C. (1999). *Análisis multivariante* (Quinta Edición). Prentice Hall.
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2014). *Metodología de la investigación*. McGraw-Hill.
- Hinsinger, P., Bengough, A. G., Vetterlein, D., & Young, I. M. (2009). Rhizosphere: Biophysics, biogeochemistry and ecological relevance. *Plant and Soil*, 321(1), 117-152. <https://doi.org/10.1007/s11104-008-9885-9>
- Jebara, S. H., Ayed, S. A., Chiboub, M., Fatnassi, I. C., Saadani, O., Abid, G., & Jebara, M. (2019). Phytoremediation of Cadmium-Contaminated Soils by Using Legumes Inoculated by Efficient and Cadmium-Resistant Plant Growth-Promoting

- Bacteria. En *Cadmium Toxicity and Tolerance in Plants* (pp. 479-493). Elsevier.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814864-8.00019-X>
- Kabata-Pendias, A. (2010). *Trace Elements in Soils and Plants* (0 ed.). CRC Press.
<https://doi.org/10.1201/b10158>
- Karlen, D. L., Mausbach, M. J., Doran, J. W., Cline, R. G., Harris, R. F., & Schuman, G. E. (1997). Soil Quality: A Concept, Definition, and Framework for Evaluation (A Guest Editorial). *Soil Science Society of America Journal*, 61(1), 4-10.
<https://doi.org/10.2136/sssaj1997.03615995006100010001x>
- Kaur, B., Singh, B., Kaur, N., & Singh, D. (2017). Phytoremediation of cadmium-contaminated soil through multipurpose tree species. *Agroforestry Systems*.
<https://doi.org/10.1007/s10457-017-0141-2>
- Kessler, M., & Schmidt-Lebuhn, A. (2006). Taxonomical and distributional notes on *Polylepis* (Rosaceae). *Organisms Diversity & Evolution*, 6(1), 67-69.
<https://doi.org/10.1016/j.ode.2005.04.001>
- Kuehl, R. O. (2001). *Diseño de experimentos. Principios estadísticos de diseño y análisis de investigación* (Segunda Edición). Thomson.
- Lloyd, H. (2008). Influence of within-patch habitat quality on high-Andean *Polylepis* bird abundance. *Ibis*, 150(4), 735-745. <https://doi.org/10.1111/j.1474-919X.2008.00843.x>
- Meza-Quispe, B. M., & Molina-LLanco, N. (2023). *Efecto de la capacidad fitorremediadora de la papa (Solanum ajanhuiri) en el porcentaje de remoción de mercurio y plomo*. [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Huancavelica].
<https://hdl.handle.net/20.500.14597/6184>
- Michael, A. (2023). Heavy Metals in Soil: A Review. *Chemical Engineering and Process Techniques*, 8(1), 1-4. <https://doi.org/10.47739/2333-6633/1076>
- Narvaez-Ttito, Y. (2024). *Especies vegetales altoandinas con potencial fitorremedidor para suelos contaminados por metales pesados del pasivo ambiental minero de Palca, Puno* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Juliaca].
<https://hdl.handle.net/20.500.14845/87>

- Nordstrom, D. K., & Alpers, C. N. (1999). Geochemistry of acid mine waters. En *In The Environmental Geochemistry of Mineral Deposits* (pp. 133-160). G.S Plumlee and M.J. Logsdon, Eds. <https://www.resolutionmineeis.us/documents/nordstorm-alpers-1999>
- Pan, P., Lei, M., Qiao, P., Zhou, G., Wan, X., & Chen, T. (2019). Potential of indigenous plant species for phytoremediation of metal(loid)-contaminated soil in the Baoshan mining area, China. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(23), 23583-23592. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05655-4>
- Park, J. H., Lamb, D., Paneerselvam, P., Choppala, G., Bolan, N., & Chung, J.-W. (2011). Role of organic amendments on enhanced bioremediation of heavy metal(loid) contaminated soils. *Journal of Hazardous Materials*, 185(2-3), 549-574. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.09.082>
- Rivera-Peña, F. D. M., Cerrón-Munive, R., Rivera-Peña, A. O., & Valdiviezo-Gonzales, L. (2024). Bioremediation of Soils Contaminated With Hydrocarbons and Heavy Metals, Huancavelica. *2024 IEEE Eighth Ecuador Technical Chapters Meeting (ETCM)*, 1-6. <https://doi.org/10.1109/ETCM63562.2024.10746172>
- Rodríguez-Eugenio, N., McLaughlin, M., & Pennock, D. (2018). *La contaminación del suelo: Una realidad oculta* (1.^a ed.). FAO. <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/i9183es>
- Romero-Arribasplata, M. B., & Bravo-Thais, S. C. (2021). *Estudio del potencial de acumulación de metales pesados de plantas nativas peruanas para la fitorremediación de pasivos mineros* [Tesis de licenciatura, Pontificia Universidad Católica del Perú]. <https://tesis.pucp.edu.pe/server/api/core/bitstreams/1ca8cf18-6127-4536-88a9-1460c07c81f2/content>
- Sauvé, S., Hendershot, W., & Allen, H. E. (2000). Solid-Solution Partitioning of Metals in Contaminated Soils: Dependence on pH, Total Metal Burden, and Organic Matter. *Environmental Science & Technology*, 34(7), 1125-1131. <https://doi.org/10.1021/es9907764>

- Simpson, B. (1979). *A Revision of the Genus Polylepis (Rosaceae: Sanguisorbeae)*. SMITHSONIAN INSTITUTION PRESS.
https://www.researchgate.net/publication/44338887_A_Revision_of_the_Genus_Polylepis_Rosaceae_Sanguisorbeae
- Smith, H. A. (1984). Cadmium. En E. Frieden (Ed.), *Biochemistry of the Essential Ultratrace Elements* (pp. 341-366). Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4684-4775-0_15
- Smith, S., & Read, D. (2008). *Mycorrhizal Symbiosis*. Elsevier.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-370526-6.X5001-6>
- Sparks, D. L. (2015). *Advances in agronomy* (1st. edition). Academic Press.
- Supo, J. (2025). *Niveles de investigación*. Sociedad Hispana de Investigadores Científicos.
- Swartjes, F. A. (Ed.). (2011). *Dealing with Contaminated Sites: From Theory towards Practical Application*. Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-90-481-9757-6>
- Vangronsveld, J., Herzig, R., Weyens, N., Boulet, J., Adriaensen, K., Ruttens, A., Thewys, T., Vassilev, A., Meers, E., Nehnevajova, E., van der Lelie, D., & Mench, M. (2009). Phytoremediation of contaminated soils and groundwater: Lessons from the field. *Environmental Science and Pollution Research International*, 16(7), 765-794. <https://doi.org/10.1007/s11356-009-0213-6>
- Virú-Vasquez, P., Pilco-Nuñez, A., Tineo-Cordova, F., Madueño-Sulca, C. T., Quispe-Ojeda, T. C., Arroyo-Paz, A., Alvarez-Arteaga, R., Velasquez-Zuñiga, Y., Oscanoa-Gamarra, L. L., Saldivar-Villarroel, J., Césare-Coral, M. F., & Nuñez-Bustamante, E. (2025). Integrated Biochar–Compost Amendment for Zea mays L. Phytoremediation in Soils Contaminated with Mining Tailings of Quiulacocha, Peru. *Plants*, 14(10), 1448. <https://doi.org/10.3390/plants14101448>
- Zutta, B. R., Rundel, P. W., Saatchi, S., Casana, J. D., Gauthier, P., Soto, A., Velazco, Y., & Buermann, W. (2012). Prediciendo la distribución de Polylepis: Bosques Andinos vulnerables y cada vez más importantes. *Revista Peruana de Biología*, 19(2), 205-212.

Anexos

1. Matriz de consistencia

Título: Remediación de suelos impactados con metales totales (Cadmio) a través de la especie *polylepis incana* (queñua) en la mina de Santa Bárbara-año 2025

Autores: Bach. Danai Rosmery Mancha Meza y Bach. Armando Antonio Vera Rojas

Problemas de investigación	Objetivos de investigación	Variables	Hipótesis	Metodología
Problema general: ¿Cuál es el efecto de la incorporación de <i>Polylepis incana</i> (queñua) en la remediación de suelos impactados por cadmio en la mina de Santa Bárbara, comparando parcelas con distintas intervenciones durante seis meses (marzo–agosto, 2025)? Problemas específicos: • ¿Las parcelas solo con queñua (parcela 2) presentan una reducción de Cd a lo largo de los seis meses comparadas con la parcela 1 (suelo solo)? • ¿Las parcelas solo con inoculación bacteriana (parcela 3) presentan una reducción de Cd a lo largo de los seis meses comparadas con la parcela 1 (suelo solo)?	Objetivo general: Determinar el efecto de la incorporación de <i>Polylepis incana</i> (queñua) en la remediación de suelos impactados por cadmio en la mina de Santa Bárbara, comparando parcelas con distintas intervenciones durante seis meses (marzo–agosto, 2025) Objetivos específicos: • Determinar que parcelas solo con queñua (parcela 2) presentan una reducción de Cd a lo largo de los seis meses comparadas con la parcela 1 (suelo solo). • Determinar que parcelas solo con inoculación bacteriana (parcela 3) presentan una reducción de Cd a lo largo de los seis meses comparadas	a) Variable independiente: Incorporación de <i>Polylepis incana</i> (queñua). b) Variables dependientes: • Cadmio (Cd) • pH • Carbono orgánico • Fósforo • Nitrógeno • Potasio • Conductividad eléctrica • Capacidad de intercambio Catiónico • Sodio • Magnesio • Densidad aparente	Hipótesis general La incorporación de <i>Polylepis incana</i> (queñua) reduce la concentración de Cd y mejora indicadores de calidad del suelo en comparación con parcelas sin queñua durante el periodo de estudio. Hipótesis específica • Las parcelas solo con queñua (parcela 2) tendrán una reducción de Cd a lo largo de los seis meses comparadas con la parcela 1 (suelo solo). • Las parcelas solo con inoculación bacteriana (parcela 3) tendrán una reducción de Cd a lo largo de los seis	Ámbito Mina Santa Bárbara, ubicada en el distrito de Santa Bárbara, provincia y región Huancavelica, Perú en el año 2025. Tipo: Aplicativo Nivel: Explicativo Método: General: Científico Específico: Experimental Diseño de investigación: Diseño factorial simple con mediciones repetidas en el tiempo. Población – muestra N: Suelos impactados por Cadmio; n: Selección de parcelas

Problemas de investigación	Objetivos de investigación	Variables	Hipótesis	Metodología
¿La presencia de Cd se correlaciona con las propiedades físico-químicas de los suelos a lo largo de los seis meses?	con la parcela 1 (suelo solo). Establecer la relación de Cd con las propiedades físico-químicas de los suelos a lo largo de los seis meses.		meses comparadas con la parcela 1 (suelo solo). La presencia de Cd se correlaciona con las propiedades físico-químicas de los suelos a lo largo de los seis meses.	Técnicas e instrumentos de recolección de datos Técnicas e instrumentos de trabajo de campo. Técnicas e instrumentos de laboratorio. Técnicas de procesamiento y análisis de datos Análisis descriptivo y comparativo y correlacional. Estadística inferencial: ANOVA, Correlación Pearson/Spearman. Programas estadísticos: Jamovi 2.6.44 y Excel.

2. Instrumentos (muestra)



LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR
EL ORGANISMO DE ACREDITACIÓN INACAL-DA
CON REGISTRO N° LE-177



INFORME DE ENSAYO IE-25-2273

Pág. 1 de 3
LAB-F-2.3.1 M08

Razon Social del cliente : ARMANDO VERA
Dirección legal del cliente : SANTA BARBARA HUANCAMELICA
Solicitado por : ARMANDO VERA
Dirección del solicitante : HUANCAMELICA
N° de Cotización : P-2025-1001
N° de Orden de Servicio : OS-25-598
Muestra(s) declarada(s) : SUELO

Procedencia de la Muestra : Nombre del Proyecto: MONITOREO AMBIENTAL SUELO 2025
Lugar de Proyecto: SANTA BARBARA

Muestreado por : CLIENTE
Cantidad de Muestra(s) : 4
Fecha de recepción de muestras: : 2025-03-03
Plan de muestreo : NO APLICA
Fecha de Análisis : 2025-03-03 al 2025-03-14
Fecha de Emisión del Informe : 2025-03-17
El presente informe es autorizado por :

Lizeth Huete Bazalar
Jefe de Laboratorio

Quím. Freddy Lira Meza
Jefe de Área de Calidad
CQP. 934

El informe de ensayo sólo es válido para las muestras referidas en el presente informe, no pudiendo extenderse los resultados del informe a ninguna otra unidad o lote que no haya sido analizado. Los resultados no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce. El informe de ensayo es un documento oficial de interés público, su adulteración o uso indebido constituye delito contra la fe pública y se regula por las disposiciones penales y civiles en la materia. Si SOMALAB S.A.C. no realizó la toma de muestra o el muestreo, los resultados se aplicarán a la muestra tal como fueron recepcionados. SOMALAB S.A.C. Deslinda responsabilidad de la información proporcionada por el cliente. No se debe reproducir el informe de ensayo, excepto en su totalidad, sin la aprobación escrita de SOMALAB S.A.C.

INFORME DE ENSAYO IE-25-2273

Código de Cliente			Muestra N° 1	Muestra N° 2	Muestra N° 3	Muestra N° 4
Descripción del Punto de Muestreo			Mina Santa Barbara	Mina Santa Barbara	Mina Santa Barbara	Mina Santa Barbara
Código de Laboratorio			M-2273-01	M-2273-02	M-2273-03	M-2273-04
Coordenadas UTM WGS 84			N: 8586158 E: 502729 A: 3615 m.s.n.m.	N: 8586158 E: 502729 A: 3615 m.s.n.m.	N: 8586158 E: 502729 A: 3615 m.s.n.m.	N: 8586158 E: 502729 A: 3615 m.s.n.m.
Instructivo de muestreo			APLICA	APLICA	APLICA	APLICA
Matriz			SUELO	SUELO	SUELO	SUELO
Muestreo	Inicio	Fecha	02-03-2025	02-03-2025	02-03-2025	02-03-2025
		Hora	10:30 hrs	11:00 hrs	11:30 hrs	12:00 hrs
	Fin	Fecha	02-03-2025	02-03-2025	02-03-2025	02-03-2025
		Hora	10:45 hrs	11:15 hrs	11:45 hrs	12:15 hrs
PARÁMETROS						
Parámetro de Ensayo	Unidades	LC.M	Resultados	Resultados	Resultados	Resultados
pH(1:2,5 en H2O)		± 0.05	6.1	6.0	6.1	6.0
Carbono orgánico	g/Kg MS	0.10	22.30	18.20	18.45	18.29
Fosforo (P)	mg/Kg	1.00	12	14	13	13
Nitrógeno (N)	g/Kg	0.05	0.6	0.8	0.85	0.76
Potasio (K)	mg/Kg	1.00	140	138	132	136
Conductividad eléctrica Ce(dS/m)	dS/m	0.01	2.3	2.2	2.5	2.1
Capacidad de intercambio iónico CIC	mol/Kg	0.10	13.6	13.8	13.7	13.6
Cadmio (Cd)	mg/Kg	0.01	21	19.7	20.5	19.4
Sodio (Na)	mg/Kg	1.00	314	320	324	315
Magnesio (Mg)	mg/Kg	1.00	334	320	290	300
Densidad aparente (Da)	g/cm3)	0.02	0.96	1.2	1.0	1.1
Clasificación Textura	Fa		Buen Drenaje	Buen Drenaje	Buen Drenaje	Buen Drenaje
Clasificación Taxonómica	Mollic ustifluventics/Francosa carbonatica mixta		Suelo Fértil	Suelo Fértil	Suelo Fértil	Suelo Fértil

LC.M: Límite de cuantificación del Método
" < ": Menor que el LC.M. indicado

INFORME DE ENSAYO IE-25-2273

Pág. 3 de 3
(LAB-2.3)

Observación:

Los resultados presentados en el informe de ensayo corresponden a las muestras que se indica en la cadena de custodia correspondiente.
Las muestras recibidas cumplen con las condiciones necesarias para la realización de los análisis solicitados.
El tiempo de custodia de la muestra depende del parámetro a ser analizado.



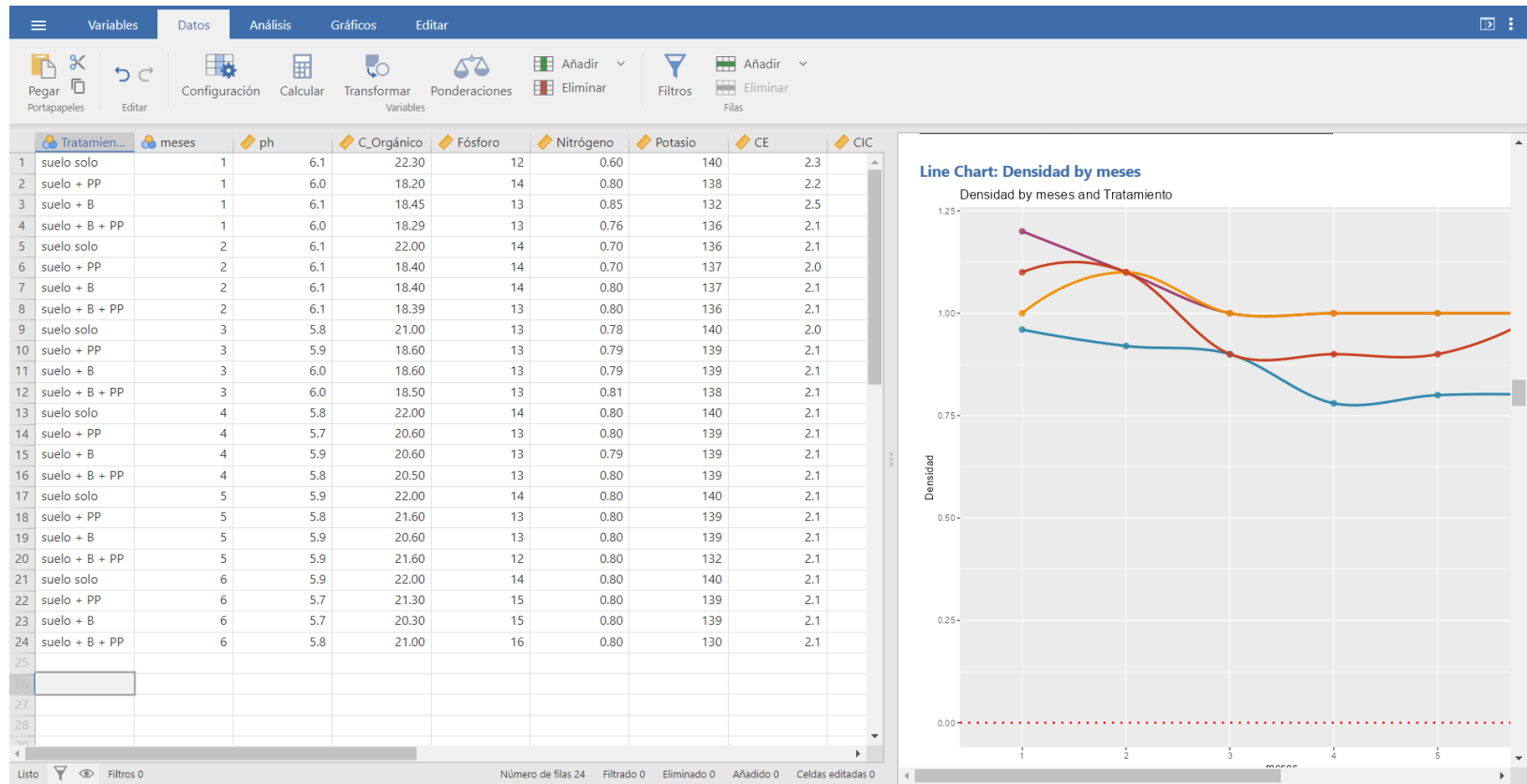
FIN DEL DOCUMENTO

El informe de ensayo sólo es válido para las muestras referidas en el presente informe, no pudiendo extenderse los resultados del informe a ninguna otra unidad o lote que no haya sido analizado. Los resultados no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce. El informe de ensayo es un documento oficial de interés público, su adulteración o uso indebido constituye delito contra la fe pública y se regula por las disposiciones penales y civiles en la materia. Si SOMALAB S.A.C. no realizó la toma de muestra o el muestreo, los resultados se aplicarán a la muestra tal como fueron recepcionadas SOMALAB S.A.C. Deslinda responsabilidad de la información proporcionada por el cliente. No se debe reproducir el informe de ensayo, excepto en su totalidad, sin la aprobación escrita de SOMALAB S.A.C.

3. Matriz de datos en Excel

Archivo Inicio Insertar Disposición de página Fórmulas Datos Revisar Vista Ayuda Nitro PDF Pro ¿Qué desea hacer? Compartir																		
Pegar Portapapeles Times New Roman 11 A A N K S Fuente Ajustar texto Combinar y centrar Alineación General % 000 Número Formato condicional Dar formato como tabla Estilos de celda Estilos Insertar Eliminar Formato Celdas Ordenar y filtrar Buscar y seleccionar Complementos																		
D28																		
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
1	Tratamiento	Meses	ph	C	Fósforo	Nitrógeno	Potasio	CE	CIC	Cd	Na	Mg	Densidad					
2	Solo suelo	Marzo	6.1	22.3	12	0.6	140	2.3	13.6	21	314	334	0.96					
3	Suelo + PP	Marzo	6	18.2	14	0.8	138	2.2	13.8	19.7	320	320	1.2					
4	Suelo + B	Marzo	6.1	18.45	13	0.85	132	2.5	13.7	20.5	324	324	1					
5	Suelo + B + PP	Marzo	6	18.29	13	0.76	136	2.1	13.6	19.4	315	315	1.1					
6	Solo suelo	Abril	6.1	22	14	0.7	136	2.1	13.3	21	319	336	0.92					
7	Suelo + PP	Abril	6.1	18.4	14	0.7	137	2	13.3	17.2	320	340	1.1					
8	Suelo + B	Abril	6.1	18.4	14	0.8	137	2.1	13.4	20.5	320	320	1.1					
9	Suelo + B + PP	Abril	6.1	18.39	13	0.8	136	2.1	13.3	16.9	318	330	1.1					
10	Solo suelo	Mayo	5.8	21	13	0.78	140	2	13.4	21	321	335	0.9					
11	Suelo + PP	Mayo	5.9	18.6	13	0.79	139	2.1	13.3	15.4	320	340	1					
12	Suelo + B	Mayo	6	18.6	13	0.79	139	2.1	13.4	19.7	320	340	1					
13	Suelo + B + PP	Mayo	6	18.5	13	0.81	138	2.1	13.3	14.7	319	338	0.9					
14	Solo suelo	Junio	5.8	22	14	0.8	140	2.1	13.5	21	335	340	0.78					
15	Suelo + PP	Junio	5.7	20.6	13	0.8	139	2.1	13.5	13.1	320	341	1					
16	Suelo + B	Junio	5.9	20.6	13	0.79	139	2.1	13.4	19	320	341	1					
17	Suelo + B + PP	Junio	5.8	20.5	13	0.8	139	2.1	13.3	10.9	290	330	0.9					
18	Solo suelo	Julio	5.9	22	14	0.8	140	2.1	13.6	21	335	340	0.8					
19	Suelo + PP	Julio	5.8	21.6	13	0.8	139	2.1	13.5	11	321	340	1					
20	Suelo + B	Julio	5.9	20.6	13	0.8	139	2.1	13.4	18.1	321	340	1					
21	Suelo + B + PP	Julio	5.9	21.6	12	0.8	132	2.1	13.2	8.5	291	328	0.9					
22	Solo suelo	Agosto	5.9	22	14	0.8	140	2.1	13.6	21	335	340	0.8					
23	Suelo + PP	Agosto	5.7	21.3	15	0.8	139	2.1	13.6	7.2	321	340	1					
24	Suelo + B	Agosto	5.7	20.3	15	0.8	139	2.1	13.3	17.4	320	340	1					
25	Suelo + B + PP	Agosto	5.8	21	16	0.8	130	2.1	13.2	3.6	290	320	1					
26																		
27																		
28																		

4. Matriz de datos en Jamovi



5. Evidencias fotográficas





UNIVERSIDAD NACIONAL DE HUANCAMELICA
FACULTAD DE CIENCIAS DE INGENIERÍA

Decanatura



RESOLUCIÓN N° 0240-2025-D-FCI-R-UNH

Huancavelica, 11 de agosto de 2025.

VISTOS

Oficio N° 000402-2025-UNH/EPIAS (11-08-2025) proveído N° 001289 (11-08-2025) en 09 folios y un archivo digital formato pdf, presentado por el Director de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental y Sanitaria, Facultad de Ciencias de Ingeniería, Universidad Nacional de Huancavelica; solicita designación de Asesor, Co-Asesor y aprobación de proyecto de tesis mediante resolución y;

CONSIDERANDO

Que, de conformidad a lo establecido por el artículo 18° de la constitución política del estado, artículo 8° de la ley Universitaria N° 30220: El Estado reconoce la autonomía universitaria. La autonomía inherente a las universidades, se ejerce de conformidad con lo establecido en la Constitución, la presente Ley y demás normativa aplicable. Esta autonomía se manifiesta en lo normativo, de gobierno, académico, administrativo y económico en el marco de la ley; artículo 37° del Estatuto: Las Facultades gozan de autonomía académica, normativa, gubernativa, administrativa y económica, dentro del marco de la ley y el estatuto;

Que, según el artículo primero de la Resolución N° 009-2024-CEU-AU-UNH (16-12-2024), proclama como decano de la Facultad de Ciencias de Ingeniería al Dr. Víctor Guillermo Sánchez Araujo ganador en la elección realizada el día 11 de diciembre de 2024 en la Universidad Nacional de Huancavelica, por consiguiente, se acredita para todos los efectos legales y de representación, debiendo asumir sus funciones a partir del 03 de mayo del 2025 al 02 de mayo del 2029.

El artículo 1° de la ley de firmas y certificados digitales aprobado mediante Ley N° 27269 señala que la misma tiene por objetivo regular la utilización de las firmas electrónicas otorgándole la misma validez y eficacia jurídica que el uso de una firma manuscrita u otra análoga que conlleve manifestación de voluntad.

Que, según artículo 13° del reglamento de grados y títulos de la Universidad Nacional de Huancavelica versión 003, aprobado con resolución N° 1068-2024-CU-UNH, de fecha 13-09-2024, de la presentación y aprobación; a) El/los bachiller (s), egresado (s) o estudiante (s) presentara (n) un a solicitud dirigida al director de la Escuela Profesional, acompañado el proyecto de tesis en medio digital formato PDF, solicitando designación del asesor, debidamente ser un docente ordinario o contratado (A1 o B1) , el asesor y co-asesor pueden ser a propuesta del interesado. En caso de convenios o financiamientos con instituciones, un representante de dicha



Este es un documento auténtico imprimible de un elemento electrónico archivado en la Universidad Nacional de Huancavelica, siguiendo lo dispuesto por el Art. 25° del D.S. 070.2013-PCM y la Tercera Disposición Complementaria Final del D.S. 026-2016-PCM. Su autenticidad e integridad pueden ser verificados a través de la siguiente dirección.
<https://appunh.com/validar-documento/5285db14-3bd6-497d-b542-520e04e03c10/verificar>



UNIVERSIDAD NACIONAL DE HUANCAMELICA
FACULTAD DE CIENCIAS DE INGENIERÍA

Decanatura



RESOLUCIÓN N° 0240-2025-D-FCI-R-UNH

Huancavelica, 11 de agosto de 2025.

institución realizaría las funciones del asesor o co-asesor; **c)** el director de escuela profesional notifica el proyecto de investigación al asesor para su revisión en el plazo máximo de quince días (15) días hábiles, debiendo este emitir un informe al director de escuela profesional dando a conocer el resultado de la evaluación, adjunto el proyecto en un medio digital. **d)** en caso de ser favorable, el director de Escuela profesional solicita al decano la designación de asesor y aprobación del proyecto de tesis, con resolución de decano; para ser notificado al responsable de investigación de la Escuela Profesional para su inscripción. **e)** *una vez emitida la resolución de aprobación del proyecto de tesis, el o los interesados procederán a ejecutar el proyecto cuya vigencia no excederá de tres años (presentación de la tesis a la escuela profesional) a partir de la fecha de la notificación de la resolución. Vencido dicho plazo el/los interesados deberán presentar un nuevo proyecto de tesis; según artículo 17°, funciones del asesor; a) velar por la calidad de la tesis; b) cumplir con los pazos establecidos en el presente reglamento; c) Asesor y velar el cumplimiento del desarrollo de la tesis por parte del o los asesorados hasta la sustentación; d) verificar la originalidad de la tesis con el software anti plagio oficial de la UNH y e) Aprobar el proyecto de tesis y la tesis, de ser pertinente;*



Que, con proveído N° 001289 de fecha 11-08-2025, el Decano de la Facultad de Ciencias de Ingeniería, autoriza al Secretario Docente emitir la resolución correspondiente.

Que, en uso de las atribuciones que le confieren al Decano y al amparo de la Ley Universitaria N° 30220 y el estatuto de la Universidad Nacional de Huancavelica.

SE RESUELVE

ARTÍCULO PRIMERO.- DESIGNAR al Dr. Wilfredo Sáez Huamán, Asesor y Dr. Víctor Guillermo Sánchez Araujo, Co-Asesor del proyecto de tesis titulado “EVALUACIÓN DE PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS Y MICROBIOLÓGICOS DEL RIO ICHU EN EL C.P. DE HUANASPAMPA, HUANCAMELICA”, de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental y Sanitaria, Facultad de Ciencias de Ingeniería, Universidad Nacional de Huancavelica.

ARTÍCULO SEGUNDO.- APROBAR el proyecto de tesis titulado: “EVALUACIÓN DE PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS Y MICROBIOLÓGICOS DEL RIO ICHU EN EL C.P. DE HUANASPAMPA, HUANCAMELICA”, presentado por **Jesimiel Nelson De La Cruz Taípe y Vladimir Paul Paitan Carbajal**, de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental y Sanitaria, Facultad de Ciencias de Ingeniería, Universidad Nacional de Huancavelica.





UNIVERSIDAD NACIONAL DE HUANCAMELICA
FACULTAD DE CIENCIAS DE INGENIERÍA

Decanatura



RESOLUCIÓN N° 0240-2025-D-FCI-R-UNH

Huancavelica, 11 de agosto de 2025.

ARTÍCULO TERCERO. - **DERIVAR** la presente resolución a la Dirección de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental y Sanitaria, Facultad de Ciencias de Ingeniería, Universidad Nacional de Huancavelica, para su conocimiento y trámite correspondiente.

Regístrese, comuníquese y archívese. -----



Firmado digitalmente por SANCHEZ
ARAUJO Víctor Guillermo FAU
20168014962 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 11.08.2025 12:07:27 -05:00

Dr. Víctor Guillermo Sánchez Araujo
Decano
Facultad de Ciencias de Ingeniería



Firmado digitalmente por SAEZ
HUAMAN Wilfredo FAU 20168014962
soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 11.08.2025 11:53:34 -05:00

Dr. Wilfredo Sáez Huamán
Secretario Docente
Facultad de Ciencias de Ingeniería



Este es un documento auténtico imprimible de un elemento electrónico archivado en la Universidad Nacional de Huancavelica, siguiendo lo dispuesto por el Art. 25° del D.S. 070.2013-PCM y la Tercera Disposición Complementaria Final del D.S. 026-2016-PCM. Su autenticidad e integridad pueden ser verificados a través de la siguiente dirección.
<https://appunh.com/validar-documento/5285db14-3bd6-497d-b542-520e04e03c10/verificar>