



UNIVERSIDAD NACIONAL DE JULIACA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL
Y FORESTAL



“EFECTO DE SUSTRATOS ENRIQUECIDOS CON CEPAS DE
RIZOBACTERIAS PARA LA PROPAGACIÓN VEGETATIVA DE
ESQUEJES DE *Polylepis* sp. EN LA LOCALIDAD DE PALCA, PUNO”

Bach. Myriam Gyanela Quispe Cañapataña

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO AMBIENTAL Y
FORESTAL

Asesor: Dr. Wile Mamani Navarro



Juliaca, 2026



UNIVERSIDAD NACIONAL DE JULIACA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL
Y FORESTAL



**“EFECTO DE SUSTRATOS ENRIQUECIDOS CON CEPAS DE
RIZOBACTERIAS PARA LA PROPAGACIÓN VEGETATIVA DE
ESQUEJES DE *Polylepis* sp. EN LA LOCALIDAD DE PALCA, PUNO”**

Bach. Myriam Gyanela Quispe Cañapataña

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO AMBIENTAL Y
FORESTAL**

Asesor: Dr. Wile Mamani Navarro



Juliaca, 2026

UNIVERSIDAD NACIONAL DE JULIACA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL
Y FORESTAL



**“EFECTO DE SUSTRATOS ENRIQUECIDOS CON CEPAS DE
RIZOBACTERIAS PARA LA PROPAGACIÓN VEGETATIVA DE
ESQUEJES DE *Polylepis* sp. EN LA LOCALIDAD DE PALCA, PUNO”**

Bach. Myriam Gyanela Quispe Cañapataña

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO AMBIENTAL Y
FORESTAL**

Asesor: Dr. Wile Mamani Navarro

Juliaca, 2026

Quispe, M. (2026). *Efecto de sustratos enriquecidos con cepas de rizobacterias para la propagación vegetativa de esquejes de Polylepis sp. en la localidad de Palca, Puno.* (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de Juliaca.

Autor: Myriam Gyanela Quispe Cañapataña

Título: Efecto de sustratos enriquecidos con cepas de rizobacterias para la propagación vegetativa de esquejes de *Polylepis* sp. en la localidad de Palca, Puno

Publicación: Juliaca, 2026

Descripción: Cantidad de páginas (169 páginas)

Nota: Tesis – Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental y Forestal– Universidad Nacional de Juliaca

Código: 01-000084-01/Q76

Nota: Incluye bibliografía

Asesor: Dr. Wile Mamani Navarro

Palabras clave: *Bacillus.*, esquejes, PGPR, *Polylepis* sp., propagación vegetal, *Pseudomonas.*

UNIVERSIDAD NACIONAL DE JULIACA

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y FORESTAL

**“EFECTO DE SUSTRATOS ENRIQUECIDOS CON CEPAS DE RIZOBACTERIAS
PARA LA PROPAGACIÓN VEGETATIVA DE ESQUEJES DE *Polylepis* sp. EN LA
LOCALIDAD DE PALCA, PUNO”**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO AMBIENTAL Y
FORESTAL**

Presentada por:

Bach. Myriam Gyanela Quispe Cañapataña

Sustentado y aprobado ante el siguiente jurado:

M.Sc. Cesar Enrique Yupanqui Bendita

PRESIDENTE DE JURADO



Dr. Yesica Magnolia Mamani Arpasi

JURADO (Secretario)


2º MIEMBRO

M.Sc. Ebed David Paredes Rodriguez

JURADO (Vocal)


3º MIEMBRO
Dr. Wile Mamani Navarro
ASESOR DE TESIS

Myriam Gyanela Quispe Cañapataña

EFECTO DE SUSTRATOS ENRIQUECIDOS CON CEPAS DE RIZOBACTERIAS PARA LA PROPAGACIÓN VEGETATIVA DE E...

 Universidad Nacional de Juliaca

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::3117:621955042

Fecha de entrega

8 sep 2026, 6:39 p.m. GMT-5

Fecha de descarga

8 sep 2026, 6:44 p.m. GMT-5

Nombre del archivo

TESIS MYRIAM GYANELA QUISPE CAÑAPATAÑA (2).pdf

Tamaño del archivo

9.0 MB

169 páginas

38.215 palabras

222.805 caracteres

 Firmado digitalmente por AQUINO
LARICO Elmer Rodrigo FAU
20448261272 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 08.09.2026 18:46:16 -05:00

9% Similitud general

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

Filtrado desde el informe

- ▶ Bibliografía
- ▶ Texto citado
- ▶ Texto mencionado
- ▶ Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

Fuentes principales

- 7%  Fuentes de Internet
- 2%  Publicaciones
- 6%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alerta de integridad para revisión

-  **Caracteres reemplazados**
53 caracteres sospechosos en N.º de páginas
Las letras son intercambiadas por caracteres similares de otro alfabeto.

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

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



Firmado digitalmente por AQUINO
LARICO Elmer Rodrigo FAU
20448261272 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 08.09.2026 18:47:01 -05:00

DEDICATORIA

A Dios

Por cuidarme, guiarme y darme la fortaleza para seguir adelante en cada paso que doy.

A mi madre Alejandra

Por su apoyo incondicional en todo momento para cumplir cada una de mis metas, por demostrarme su cariño y porque ha velado por mi bienestar y educación.

A mi padre Miguel

Quien ha sabido formarme con buenos valores, por todo su esfuerzo, por apoyarme y ayudarme siempre con entusiasmo.

A mi hermana Thalia

Por alentarme a seguir adelante y por brindarme su apoyo constante.

A mi querida amiga Nayder

Quien estuvo presente durante este proceso, brindándome su compañía en los momentos que más necesité.

A ellos les dedico todo mi esfuerzo, ya que son un gran apoyo en mis estudios y mi mayor inspiración para seguir adelante.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Universidad Nacional de Juliaca por brindarme un centro de estudios que forme mi capacidad como profesional.

También a mis padres, por el apoyo y amor incondicional que siempre me brindan.

Al Dr. Wile Mamani Navarro por su apoyo y asesoramiento.

A la Blga. Liz Pamela Jaramillo y la Ing. Yoissy Pari por compartir sus conocimientos y brindarme orientación.

Agradezco al Blgo. Lorgio Palacios por su apoyo en el desarrollo en la fase de laboratorio.

*Al Jardín Botánico de Missouri, por el apoyo brindado en coordinación con el Dr. Alejandro Taquire, en la caracterización de muestras de *Polylepis* sp.*

Al SERFOR por otorgar los permisos necesarios para la presente investigación.

Gracias a la vida y las personas que siempre me apoyaron, dando alientos a no rendirme y seguir siempre adelante.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTOS	ii
ÍNDICE GENERAL	iii
ÍNDICE DE TABLAS	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
ÍNDICE DE ANEXOS	x
ACRÓNIMOS	xi
RESUMEN	12
ABSTRACT	13
INTRODUCCIÓN	14

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Formulación del problema	16
1.1.1. Problema general	17
1.1.2. Problemas específicos	18
1.2. Objetivo de la investigación	18
1.2.1. Objetivo general	18
1.2.2. Objetivos específicos	18
1.3. Justificación de la Investigación	18
1.3.1. Justificación social	18
1.3.2. Justificación ambiental	19
1.3.3. Justificación técnica	20
1.3.4. Justificación económica	21

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Antecedentes de la investigación	22
2.1.1. Antecedentes internacionales	22
2.1.2. Antecedentes nacionales	25
2.1.3. Antecedentes regionales y locales	29
2.2. Marco teórico	29
2.2.1. Generalidades de <i>Polylepis</i>	29
2.2.2. Reproducción de las especies vegetativas	36

3.10.1. Preparación de sustratos	67
3.10.2. Llenado de bolsas/Enfundado	69
3.10.3. Riego	69
3.10.4. Selección y recolección de material vegetativo	69
3.10.5. Producción de inóculos bacterianos	70
3.10.6. inoculación de esquejes con bacterias promotoras de crecimiento vegetal ...	70
3.10.7. Deshierbe.....	71
3.11. Determinación del efecto de los sustratos enriquecidos con cepas de rizobacterias en el enraizamiento y desarrollo de esquejes de <i>Polylepis</i> sp.....	71
3.11.1. Parámetros evaluados	72
3.12. Análisis estadístico.....	72

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Resultado del aislamiento e identificación de cepas de rizobacterias promotoras de crecimiento vegetal asociadas al bosque andino de <i>Polylepis</i> sp.....	74
4.1.1. Caracterización morfológica, caracterización bioquímica y Tinción Gram ..	74
4.1.2. Capacidad promotora de crecimiento vegetal	77
4.2. Resultados del enriquecimiento de los sustratos con rizobacterias promotoras de crecimiento vegetal aisladas e identificadas	80
4.3. Resultados del efecto de los sustratos enriquecidos con cepas de rizobacterias en el enraizamiento y desarrollo de esquejes de <i>Polylepis</i> sp.....	83
4.3.1. Porcentaje de enraizamiento.....	84
4.3.2. Longitud de raíz	89
4.3.3. Altura.....	94
4.3.4. Número de folíolos.....	99
4.3.5. Numero de brotes	108

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones	119
5.2. Recomendaciones.....	120
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	121
ANEXOS	138

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Estado de conservación de especies del género <i>Polylepis</i> reportadas en Sudamérica.....	31
Tabla 2 Distribución de las especies del género <i>Polylepis</i> registradas en el departamento de Puno.....	33
Tabla 3 Descripción de variables en estudio.....	56
Tabla 4 Descripción de tratamientos.....	58
Tabla 5 Proporción de sustratos	67
Tabla 6 Análisis de parámetros fisicoquímicos de sustratos.....	68
Tabla 7 Esquema del análisis de varianza para el Diseño en Bloques Completamente al Azar (DBCA) con arreglo factorial.....	73
Tabla 8 Recuento de bacterias aisladas de la rizosfera de <i>Polylepis</i> sp.	74
Tabla 9 Caracterización morfológica, caracterización bioquímica y Tinción Gram	75
Tabla 10 Índice de solubilización de fosfato (ISF) y AIA cualitativo para <i>Bacillus</i> y <i>Pseudomonas</i>	78
Tabla 11 Parámetros fisicoquímicos de los sustratos utilizados.....	81
Tabla 12 Análisis de varianza para el porcentaje de enraizamiento de los esquejes de <i>Polylepis</i> sp.....	84
Tabla 13 Prueba de Tukey para el porcentaje de enraizamiento según PGPR y sustrato.....	85
Tabla 14 Comparación de medias de los tratamientos para el porcentaje de enraizamiento mediante la prueba de Tukey.....	86
Tabla 15 Análisis de varianza para la longitud de raíz de los esquejes de <i>Polylepis</i> sp.	89
Tabla 16 Prueba de Tukey para la longitud de raíz según PGPR y sustrato.....	90
Tabla 17 Comparación de medias de los tratamientos para la longitud de raíz mediante la prueba de Tukey.	91
Tabla 18 Análisis de varianza para incremento de altura de los esquejes de <i>Polylepis</i> sp.	94
Tabla 19 Prueba de Tukey para el incremento de la altura según PGPR y sustrato.....	95
Tabla 20 Comparación de medias de los tratamientos para incremento de altura mediante la prueba de Tukey.	96
Tabla 21 Análisis de varianza para el número de folíolos a los 30 días de esquejes de <i>Polylepis</i> sp.....	99

Tabla 22 <i>Prueba de Tukey para el número de folíolos a los 30 días según PGPR y sustrato</i>	100
Tabla 23 <i>Análisis de varianza para el número de folíolos a los 60 días de esquejes de <i>Polylepis</i> sp.</i>	102
Tabla 24 <i>Prueba de Tukey para el número de folíolos a los 60 días según PGPR y sustrato</i>	103
Tabla 25 <i>Análisis de varianza para el número de folíolos a los 90 días de esquejes de <i>Polylepis</i> sp.</i>	104
Tabla 26 <i>Prueba de Tukey para el número de folíolos a los 90 días según PGPR y sustrato.</i>	104
Tabla 27 <i>Comparación de medias de los tratamientos del número de folíolos a los 90 días mediante la prueba de Tukey.</i>	105
Tabla 28 <i>Análisis de varianza para el número de brotes a los 30 días de esquejes de <i>Polylepis</i> sp.</i>	109
Tabla 29 <i>Prueba de Tukey para el número de brotes a los 30 días según PGPR y sustrato</i>	110
Tabla 30 <i>Análisis de varianza para el número de brotes a los 60 días de esquejes de <i>Polylepis</i> sp.</i>	111
Tabla 31 <i>Prueba de Tukey para el número de brotes a los 60 días según PGPR y sustrato</i>	112
Tabla 32 <i>Análisis de varianza para el número de brotes a los 90 días de esquejes de <i>Polylepis</i> sp.</i>	113
Tabla 33 <i>Prueba de Tukey para el número de brotes a los 90 días según PGPR y sustrato</i>	114
Tabla 34 <i>Comparación de medias de los tratamientos del número de brotes a los 90 días mediante la prueba de Tukey.</i>	115
Tabla 35 <i>Composición de Agua peptonada (TM Media)</i>	138
Tabla 36 <i>Composición de Solución Salina</i>	138
Tabla 37 <i>Composición de Medio King B (HiMedia)</i>	138
Tabla 38 <i>Composición de Agar nutritivo (Mast Group)</i>	139
Tabla 39 <i>Composición de Caldo Trypticase de Soya -Tryptone Soya Broth (HiMedia)</i>	139
Tabla 40 <i>Composición de Medio Pikovskaya (HiMedia)</i>	139
Tabla 41 <i>Composición del reactivo Salkowski.</i>	140
Tabla 42 <i>Composición del Reactivo Salkowski preparación para 100 ml</i>	140

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 <i>Interrelaciones rizobacterias y especies vegetativas.</i>	44
Figura 2 <i>Área de estudio del proyecto de investigación</i>	60
Figura 3 <i>Flujograma para identificación de bacterias</i>	66
Figura 4 <i>Árbol de Polylepis sp. en el bosque de Antalla, distrito de Palca.</i>	153
Figura 5 <i>Vista general del bosque de Polylepis sp. en Antalla en zona altoandina.</i>	153
Figura 6 <i>Muestro de la Rizosfera de Polylepis sp. en el bosque de Antalla, distrito de Palca</i>	154
Figura 7 <i>Transporte y almacenamiento de muestras de suelo para análisis microbiológico</i>	154
Figura 8 <i>Preparación de muestras de suelo para diluciones seriadas</i>	155
Figura 9 <i>Preparación de diluciones seriadas a partir de muestras de suelo rizosférico.</i>	155
Figura 10 <i>Siembra de diluciones en medio de cultivo</i>	156
Figura 11 <i>Distribución del inóculo en placas mediante técnica de extensión superficial</i>	156
Figura 12 <i>Incubación de placas para el crecimiento de colonias bacterianas</i>	157
Figura 13 <i>Pruebas de caracterización bacteriana (a) prueba de catalasa. y (b) tinción de Gram</i>	157
Figura 14 <i>Identificación de los géneros Pseudomonas (A) y Bacillus (B) en microscopio óptico con un objetivo de 100 x</i>	158
Figura 15 <i>Prueba bioquímica de catalasa en (A) Pseudomonas y (B) Bacillus</i>	158
Figura 16 <i>Prueba de fluorescencia en cepas de género Bacillus (A) y Pseudomonas (B)</i>	159
Figura 17 <i>Colonias seleccionadas de Pseudomonas (A) y Bacillus (B), elegidas en función de su compatibilidad morfológica.</i>	159
Figura 18 <i>Prueba de solubilización de fosfato en el medio PVK para Pseudomonas (A) y Bacillus (B)</i>	160
Figura 19 <i>Reacciones positivas de AIA presentadas por Pseudomonas (A) y Bacillus (B) frente al control (C).</i>	160
Figura 20 <i>Suspensiones bacterianas a diferentes concentraciones para su aplicación en la inoculación</i>	161

Figura 21 <i>Abonos considerados para la investigación como humus de lombriz (A), compost de materia orgánica (B) y estiércol de bovino tamizado(C).</i>	161
Figura 22 <i>Pasteurización de estiércol bovino.</i>	162
Figura 23 <i>Preparación de sustratos para el establecimiento de tratamientos.....</i>	162
Figura 24 <i>Recolección de esquejes a partir de ramas de Polylepis sp.</i>	163
Figura 25 <i>Esquejes recolectados de Polylepis sp. para propagación vegetativa.</i>	163
Figura 26 <i>Inoculación de esquejes y sustratos con rizobacterias (A) inmersión de esquejes en el inóculo bacteriano y (B) aplicación del inóculo en el sustrato.</i>	164
Figura 27 <i>Comparación del desarrollo radicular a los 90 días de esquejes de Polylepis sp. inoculados con Bacillus sp.</i>	164
Figura 28 <i>Comparación del desarrollo radicular a los 90 días de esquejes de Polylepis sp. inoculados con Pseudomonas sp.</i>	165
Figura 29 <i>Comparación del número de folíolos en esquejes de Polylepis sp. inoculados con Pseudomonas sp. a los 90 días.</i>	165
Figura 30 <i>Comparación del número de folíolos en esquejes de Polylepis sp. inoculados con Bacillus sp. a los 90 días.</i>	166
Figura 31 <i>Comparación de la altura de esquejes de Polylepis sp. inoculados con Bacillus sp. y Pseudomonas sp.</i>	166

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo I. <i>Composición de medios de cultivo</i>	138
Anexo II. <i>Reactivo Salkowski</i>	140
Anexo III. <i>Informe de ensayo de laboratorio de suelo</i>	141
Anexo IV. <i>Constancia de identificación taxonómica de Polylepis sp.</i>	143
Anexo V. <i>Informe de ensayo de laboratorio de agua - riego</i>	144
Anexo VI. <i>Constancia de uso de laboratorio</i>	146
Anexo VII. <i>Autorización para la investigación</i>	147
Anexo VIII. <i>Panel fotográfico</i>	153

ACRÓNIMOS

AIA	: Ácido indolacético
ANOVA	: Análisis de varianza
CIC	: Capacidad de intercambio catiónico
CM	: Compost de materia orgánica
DBCA	: Diseño de bloques completamente al azar
EB	: Estiércol bovino
FBN	: Fijación biológica de nitrógeno
gl	: Grados de libertad
HL	: Humus de lombriz
NPK	: Nitrógeno, fósforo y potasio
p	: Nivel de significancia estadística
PGPR	: Plant Growth-Promoting Rhizobacteria (Rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal)
PVK	: Medio Pikovskaya
SC	: Suma de cuadrados
TA	: Tierra agrícola
UFC	: Unidades formadoras de colonias
UV	: Ultravioleta

RESUMEN

Actualmente las poblaciones de *Polylepis* en la región Puno se encuentran fragmentadas y presentan dificultades en su propagación vegetativa. El estudio tuvo como objetivo evaluar el efecto de sustratos enriquecidos con cepas de rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR) sobre la propagación de *Polylepis* sp. Con este propósito, los objetivos específicos fueron aislar e identificar cepas asociadas al bosque de *Polylepis* sp, enriquecer sustratos con dichas cepas y evaluar su efecto en el enraizamiento y desarrollo de esquejes de *Polylepis* sp. en la localidad de Palca, Puno. La investigación se desarrolló bajo un diseño de bloques completamente al azar (DBCA) con 28 tratamientos. Se aislaron e identificaron las cepas mediante pruebas microbiológicas y bioquímicas, seleccionando las de mayor potencial PGPR. Posteriormente, estas cepas se inocularon en cuatro de sustratos: CM (compost de materia orgánica +arena+ tierra agrícola), HL (Humus de lombriz +arena+ tierra agrícola), EB (estiércol de bovino +arena+ tierra agrícola) y TA (tierra agrícola) en proporciones de 2:½:3 con concentraciones de 1×10^8 , 1×10^6 y 1×10^4 UFC/mL. Se evaluó el porcentaje de enraizamiento, altura, longitud de raíz, número de brotes y folíolos. Los resultados evidenciaron la identificación de las cepas BcA y PsB correspondientes al género *Bacillus* y *Pseudomonas* respectivamente. El enriquecimiento de los sustratos con cepas bacterianas influyó diferencialmente en las variables evaluadas. El tratamiento T20 (CM + *Bacillus* sp. 1×10^8 UFC/mL) registró el mayor porcentaje de enraizamiento (62.5 %) y la mayor longitud de raíz (23.40 cm). Asimismo, el tratamiento T10 (EB + *Pseudomonas* sp. 1×10^8 UFC/mL) presentó el mayor número de folíolos (24.25) y el mayor incremento de altura (5.40 cm). Finalmente, se concluye que los sustratos enriquecidos con PGPR favorecieron el desarrollo vegetativo de los esquejes *Polylepis* sp., constituyendo una alternativa para fortalecer su propagación vegetativa y los programas de reforestación.

Palabras clave: *Bacillus*., esquejes, PGPR, *Polylepis* sp., propagación vegetal, *Pseudomonas*.

ABSTRACT

Currently, *Polylepis* populations in the Puno region are fragmented and face challenges in their vegetative propagation. This study aimed to evaluate the effect of substrates enriched with plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) strains on the propagation of *Polylepis* sp. To this end, the specific objectives were to isolate and identify strains associated with the *Polylepis* sp. forest, enrich substrates with these strains, and evaluate their effect on the rooting and development of *Polylepis* sp. cuttings in the locality of Palca, Puno. The research was conducted using a completely randomized block design (CRBD) with 28 treatments. The strains were isolated and identified through microbiological and biochemical tests, selecting those with the greatest PGPR potential. Subsequently, these strains were inoculated into four substrates: CM (organic matter compost + sand + agricultural soil), HL (vermicompost + sand + agricultural soil), EB (bovine manure + sand + agricultural soil), and TA (agricultural soil) in 2:1:3 ratios with concentrations of 1×10^8 , 1×10^6 , and 1×10^4 CFU/mL. The percentage of rooting, height, root length, number of shoots, and number of leaflets were evaluated. The results confirmed the identification of the BcA and PsB strains, corresponding to the genera *Bacillus* and *Pseudomonas*, respectively. The enrichment of the substrates with bacterial strains differentially influenced the evaluated variables. Treatment T20 (CM + *Bacillus* sp. 1×10^8 CFU/mL) showed the highest rooting percentage (62.5%) and the greatest root length (23.40 cm). Similarly, treatment T10 (EB + *Pseudomonas* sp. 1×10^8 CFU/mL) exhibited the highest number of leaflets (24.25) and the greatest increase in height (5.40 cm). In conclusion, substrates enriched with PGPR favored the vegetative development of *Polylepis* sp. cuttings, representing an alternative for strengthening their vegetative propagation and reforestation programs.

Keywords: *Bacillus* sp., cuttings, PGPR, *Polylepis* sp., plant propagation, *Pseudomonas* sp.

INTRODUCCIÓN

Los bosques altoandinos dominados por especies del género *Polylepis* constituyen uno de los ecosistemas más vulnerables y fragmentados de la cordillera de los Andes. Estas formaciones vegetales cumplen funciones ecológicas esenciales, entre ellas la regulación hídrica, la protección de los suelos frente a la erosión, la captura de carbono atmosférico y la conservación de biodiversidad. Sin embargo, diversos estudios señalan que su extensión se ha reducido considerablemente debido a la presión antrópica, el sobrepastoreo, la extracción de leña, los incendios y los efectos del cambio climático, generando procesos de fragmentación y pérdida de cobertura vegetal (Fjeldså, 2002; Cuyckens & Renison, 2018). En la región Puno, esta problemática se intensifica por las condiciones climáticas extremas propias de zonas superiores a los 3800 msnm, donde las bajas temperaturas, heladas frecuentes y limitaciones hídricas dificultan la regeneración natural de estas especies (Montesinos et al., 2015; Sevillano & Morales, 2021).

Frente a este escenario, la restauración ecológica de bosques de *Polylepis* se ha convertido en una necesidad prioritaria para recuperar servicios ecosistémicos y fortalecer la resiliencia ambiental de los paisajes altoandinos. Una de las alternativas más utilizadas es la propagación vegetativa mediante esquejes, técnica que permite conservar características deseables del material madre y reducir los tiempos de producción en vivero. No obstante, en especies forestales nativas de crecimiento lento, el enraizamiento y el desarrollo inicial suelen ser limitados, debido principalmente a la baja capacidad de emisión de raíces adventicias y a la sensibilidad fisiológica del material vegetal durante las primeras fases de establecimiento (Quispe, 2021; Romero, 2021). Por ello, resulta necesario incorporar estrategias complementarias que mejoren la eficiencia de propagación vegetativa.

En los últimos años, las rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR) han despertado gran interés como herramienta biotecnológica sostenible en viveros forestales y sistemas agrícolas. Estos microorganismos colonizan la rizósfera y favorecen el crecimiento de las plantas mediante mecanismos directos, como la producción de fitohormonas, solubilización de fósforo, fijación biológica de nitrógeno. Asimismo, actúan de manera indirecta al inhibir patógenos, producir sideróforos e inducir respuestas de tolerancia frente al estrés ambiental (Moreno et al., 2018; Wang et al., 2023). Entre los géneros más estudiados destacan *Bacillus* y *Pseudomonas*, debido a su capacidad de adaptación y

resultados favorables en distintas especies vegetales (Chaiya et al., 2021; Nwigwe et al., 2023; Trujillo et al., 2022).

A pesar de los avances reportados en otras especies, el uso de PGPR en programas de propagación de *Polylepis* aún es escaso, especialmente en condiciones altoandinas del sur del Perú. Está limitada información científica restringe la aplicación de tecnologías biológicas que podrían mejorar significativamente el enraizamiento y vigor inicial de los esquejes. En consecuencia, surge la necesidad de evaluar microorganismos nativos adaptados a ecosistemas de altura, ya que podrían presentar mayor eficiencia bajo condiciones ambientales locales.

En ese contexto, la presente investigación tuvo como propósito identificar cepas de rizobacterias provenientes del bosque andino de *Polylepis* de Palca, enriquecer distintos tipos de sustratos con dichas bacterias y evaluar su efecto sobre el enraizamiento y desarrollo de esquejes de *Polylepis* sp.. A partir de ello, se busca determinar si la inoculación con cepas de *Bacillus* y *Pseudomonas* incrementa significativamente las variables de respuesta. Los resultados obtenidos buscan aportar bases científicas para la implementación de técnicas de restauración ecológica en ecosistemas altoandinos.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Formulación del problema

A nivel mundial, los ecosistemas forestales han experimentado una significativa degradación debido a la actividad humana, afectando su biodiversidad y funcionalidad ecológica, ya que generan pérdidas de muchos servicios ecosistémicos (Haddad et al., 2015). Dentro de estos ecosistemas, los bosques del género *Polylepis* constituyen uno de los ecosistemas más vulnerables de la Cordillera Oriental de América del Sur desde Venezuela, Colombia y Ecuador, pasando por Perú y Bolivia, hasta el centro de Argentina y el norte de Chile (Fjeldsø & Kessler, 1996). Como consecuencia de la fragmentación forestal la cual disminuye la dispersión entre poblaciones y provoca una pérdida de diversidad genética (Quinteros et al., 2012).

En el Perú, los bosques del género *Polylepis* destacan por desarrollarse en ecosistemas altoandinos y albergar una importante diversidad biológica, además de cumplir funciones clave en la regulación hídrica y la protección del suelo. Sin, embargo su situación es particularmente crítica, se estima que más del 90% de estos ecosistemas ha desaparecido a lo largo del tiempo (Boza & Kessler, 2022), debido a la expansión de la agricultura, la deforestación, invasión de especies exóticas, actividad ganadera, la minería y la construcción de infraestructura vial (Cuyckens & Renison, 2018). Además, su regeneración natural presenta dificultades asociadas a factores ecológicos y fisiológicos propios del género, lo que limita su capacidad de establecimiento y recuperación (Cerrón et al., 2025).

El género *Polylepis* presenta una baja viabilidad germinativa de sus semillas, ello ha impulsado el uso de métodos de propagación vegetativa, como los esquejes, para facilitar la producción de plantas, aunque aún este método presenta dificultades en la capacidad de enraizamiento (Renison et al., 2004). No obstante, la incorporación de diferentes tratamientos biotecnológicos ha demostrado incrementar el porcentaje de enraizamiento y mejora de la eficiencia de propagación vegetativa (Vega et al., 2007). Por otra parte, no depende únicamente de las técnicas empleadas, sino también del entorno de propagación, el sustrato juega un papel determinante al influir en factores esenciales para el establecimiento de las plántulas (Hartmann et al., 2011).

En la región de Puno, la propagación vegetativa de especies del género *Polylepis* mediante esquejes presenta dificultades en el enraizamiento y establecimiento bajo condiciones naturales, lo que restringe la producción eficiente de plantones para programas de reforestación y restauración ecológica. En el marco de esta problemática su regeneración natural se encuentra limitada por diversos factores bióticos y abióticos propios del género, además de la influencia de factores antrópicos (Cerrón et al., 2025). Los estudios relacionados con la propagación vegetativa y el mejoramiento de procesos de enraizamiento en especies de *Polylepis* aún son limitados, especialmente bajo las condiciones ambientales propias de la región. Como consecuencia esta problemática reduce la capacidad de recuperación de estos ecosistemas, afectando la disponibilidad de hábitats, la pérdida de biodiversidad asociada, disminución de servicios ecosistémicos y la reducción de área a pequeños relictos dispersos (Jameson & Ramsay, 2007).

En los últimos años las rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR) han adquirido relevancia como una alternativa biotecnológica sostenible para mejorar el crecimiento y establecimiento de diversas especies vegetales. Además, cuando estas rizobacterias se incorporan en sustratos orgánicos genera un efecto sinérgico superior al uso individual de cada componente (Wang & Xu, 2026). En consecuencia, la interacción entre los microorganismos y el sustrato se considera un factor determinante para favorecer el establecimiento y crecimiento inicial de las plántulas (Memelli et al., 2026). En ese sentido, surge la necesidad de evaluar el efecto de diferentes sustratos enriquecidos con cepas nativas de PGPR sobre el enraizamiento y desarrollo de esquejes de *Polylepis* sp en condiciones altoandinas con el propósito de generar evidencia científica que contribuya al fortalecimiento de las estrategias de propagación vegetativa y restauración de los ecosistemas forestales del género *Polylepis*.

1.1.1. Problema general

¿Cuál es el efecto de los sustratos enriquecidos con cepas de rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal en la propagación vegetativa de esquejes de *Polylepis* sp. en la localidad de Palca, Puno?

1.1.2. Problemas específicos

- ¿Cuáles son las cepas de rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal asociadas al bosque andino de *Polylepis sp.* en la localidad de Palca, Puno?
- ¿Cómo se realiza el enriquecimiento de los sustratos con las cepas de rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR) seleccionadas?
- ¿Cuál es el efecto de los sustratos enriquecidos con cepas de rizobacterias en el enraizamiento y desarrollo de esquejes de *Polylepis sp.*?

1.2. Objetivo de la investigación

1.2.1. Objetivo general

Determinar el efecto de los sustratos enriquecidos con cepas de rizobacterias en la propagación vegetativa de esquejes de *Polylepis sp.* en la localidad de Palca, Puno.

1.2.2. Objetivos específicos

- Aislar e identificar las cepas de rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal asociadas al bosque andino de *Polylepis sp.* en la localidad de Palca, Puno.
- Enriquecer los sustratos a emplear como tratamientos con las bacterias promotoras del crecimiento aisladas e identificadas previamente.
- Determinar el efecto de los sustratos enriquecidos con cepas de rizobacterias en el enraizamiento y desarrollo de esquejes de *Polylepis sp.*

1.3. Justificación de la investigación

1.3.1. Justificación social

Los bosques altoandinos del género *Polylepis* constituyen un recurso estratégico para las comunidades rurales andinas, debido a que contribuyen a la provisión de leña, protección de fuentes de agua, conservación de suelos y mantenimiento de servicios ecosistémicos fundamentales para las actividades agropecuarias locales (Kómetter, 2011). La degradación y reducción progresiva de estos bosques disminuye la disponibilidad de dichos servicios, afectando indirectamente a comunidades que dependen de ellos para el desarrollo de sus actividades productivas (Gil et al., 2021).

En este contexto, fortalecer los procesos de propagación de especies del género *Polylepis* constituye una necesidad para incrementar la disponibilidad de plántones destinados a programas de reforestación por instituciones públicas, gobiernos locales, organizaciones no gubernamentales y comunidades campesinas comprometidos con la recuperación de ecosistemas degradados (Boza & Kessler, 2022). Sin embargo, la limitada capacidad de enraizamiento de los esquejes continúa representando una de las principales restricciones para la producción de material vegetal, lo que evidencia la necesidad de evaluar biotecnológicas alternativas que optimicen este proceso (Renison et al., 2004).

De esta manera, la evaluación de sustratos enriquecidos con cepas nativas de rizobacterias promotoras de crecimiento vegetal permitirá generar conocimiento e información sobre métodos innovadores que podrá ser utilizada por viveros forestales, fortaleciendo las capacidades técnicas de los actores involucrados en la producción y conservación de *Polylepis* sp. y promoviendo la adopción de prácticas de propagación más eficientes y sostenibles. Además, servirá como base para futuras investigaciones y para fortalecer programas de restauración ecológica, contribuyendo indirectamente a la recuperación de áreas degradadas y a la conservación de los servicios ecosistémicos asociados a estos bosques (Romo, 2017).

1.3.2. Justificación ambiental

Los bosques de *Polylepis* son considerados ecosistemas prioritarios para la conservación de la biodiversidad andina debido a su capacidad para albergar especies endémicas de flora y fauna, regular el ciclo hidrológico, proteger los suelos contra la erosión y contribuir al almacenamiento de carbono atmosférico (Sevillano & Morales, 2021). No obstante, estos ecosistemas presentan elevados niveles de fragmentación y degradación ocasionados por incendios, expansión agrícola, sobrepastoreo, extracción de leña y efectos asociados al cambio climático (Cuyckens & Renison, 2018). Además, en estos bosques la perturbación antrópica disminuye la capacidad de regeneración natural y favorece el aislamiento de las poblaciones remanentes, incrementando el riesgo de pérdida de biodiversidad (Cierjacks et al., 2008).

En este contexto, la restauración ecológica mediante la producción de plantones constituye una estrategia fundamental para recuperar la cobertura vegetal y restablecer las funciones ecosistémicas de estos bosques. Para ello, el uso de sustratos orgánicos como compost, humus de lombriz y estiércol son alternativas sostenibles que reducen la dependencia de la turba, un recurso no renovable y favorecen la valorización de residuos orgánicos en el marco de una economía circular (Atzori et al., 2021). De esta manera, la presente investigación incorpora el enriquecimiento biológico de estos sustratos mediante cepas nativas de rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR), las cuales constituyen una alternativa ambientalmente sostenible al favorecer el crecimiento de las plantas y mejorar la disponibilidad de nutrientes, reduciendo potencialmente la dependencia de fertilizantes químicos y promoviendo el empleo de microorganismos nativos adaptados a las condiciones altoandinas (Wang et al., 2023; Chieb & Gachomo, 2023).

1.3.3. Justificación técnica

La restauración de bosques altoandinos requiere disponer de métodos eficientes para la producción masiva de plantones de especies nativas como *Polylepis* sp., debido a que su regeneración natural es limitada y la propagación por semillas presenta restricciones asociadas a baja viabilidad, germinación irregular y crecimiento inicial lento. Diversos estudios indican que la propagación vegetativa mediante esquejes constituye una alternativa técnica viable, ya que permite obtener individuos uniformes a partir de árboles seleccionados y reducir los tiempos de establecimiento en vivero (Salazar et al., 2020).

No obstante, uno de los principales problemas en este método es el bajo porcentaje de enraizamiento y la escasa formación radicular, especialmente cuando se emplean sustratos convencionales sin acondicionamiento o con baja disponibilidad de nutrientes. En este contexto, la presente investigación se justifica técnicamente en la necesidad de evaluar el uso de sustratos orgánicos como compost de materia orgánica, humus de lombriz, estiércol bovino y tierra agrícola, donde si bien el uso de sustratos adecuados constituye un factor determinante en el enraizamiento y desarrollo de los esquejes, su combinación

con cepas de rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal potencia significativamente estos efectos, lo cual permitiría optimizar las condiciones físico-químicas y biológicas del medio de enraizamiento.

El uso de géneros bacterianos como *Bacillus* y *Pseudomonas* puede mejorar la eficiencia de propagación al estimular el crecimiento mediante producción de fitohormonas, solubilización de nutrientes y mejor colonización rizosférica (Moreno et al., 2018; Wang et al., 2023). Por ello, los resultados permitirán identificar combinaciones de sustrato e inoculación más eficientes para optimizar protocolos de viverización de *Polylepis* sp. en condiciones altoandinas.

1.3.4. Justificación económica

La producción convencional de plantones forestales destinados a programas de restauración requiere la inversión de recursos económicos asociados al manejo de vivero, adquisición de sustratos y la producción de material vegetal de calidad, aspectos que influye directamente en la eficiencia y viabilidad de estos programas (Haase et al., 2021). Por lo cual la evaluación de materiales orgánicos de amplia disponibilidad local como compost, humus y estiércol, constituye una alternativa técnicamente viable para la formulación de sustratos de propagación que puedan ser implementadas por viveros forestales utilizando recursos disponibles en la región; promoviendo así sistemas de producción más sostenibles frente a sustrato comerciales (Atzori et al., 2021).

Asimismo, el enriquecimiento de estos sustratos con cepas nativas de rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR) constituye una estrategia biotecnológica que puede incrementar la eficiencia de propagación de *Polylepis* sp. al favorecer el enraizamiento y el desarrollo inicial de los esquejes (Backer et al., 2018). En consecuencia, la identificación de combinaciones eficientes de sustratos y PGPR permitirá otorgar alternativas que contribuyan a optimizar la producción de plantones en vivero. Ello implicaría un mejor aprovechamiento de los recursos destinados a la producción de plantones, favoreciendo de esta manera el uso más eficiente de los insumos y menor tiempo de permanencia en vivero, los cuales son aspectos determinantes en costos operativos de viveros forestales (Simões et al., 2021).

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Antecedentes de la investigación

2.1.1. Antecedentes internacionales

Gordillo et al. (2025)., evaluaron el efecto de una cepa nativa de *Pseudomonas* sobre el enraizamiento adventicio de estacas leñosas de vid. Los resultados mostraron que la inoculación con la cepa *Pseudomonas* 42P4 incrementó el porcentaje de enraizamiento, alcanzando valores superiores al 80 % en estacas de Malbec y 90 % en material injertado Paulsen, concluyendo que las PGPR constituyen una estrategia promisorio para mejorar la propagación vegetativa de especies leñosas.

Nwigwe et al. (2023) evaluaron la capacidad de enraizamiento de esquejes de *Eucalyptus grandis* y *E. nitens*, se inoculó consorcios rizosféricos de *Pseudomonas* sp. y *Bacillus* sp., los esquejes de ambos híbridos también demostraron altas tasas de supervivencia y porcentaje de enraizamiento, promoviendo el desarrollo de raíces adventicias.

Zapalowska et al. (2023) evaluaron las propiedades nutricionales de mezclas de sustratos elaboradas con compost para la producción de plántulas de pepino. Los resultados evidenciaron contenidos de nitrógeno entre 1.34 y 3.60 %, fósforo disponible entre 46.9 y 975 mg 100 g⁻¹, potasio disponible entre 33.0 y 572 mg 100 g⁻¹, calcio entre 2.13 y 18.08 g kg⁻¹ y magnesio entre 1.37 y 4.17 g kg⁻¹. Los autores concluyeron que la incorporación de compost mejora la disponibilidad de nutrientes del sustrato.

Moreno & Romero (2022) propagaron *Polylepis quadrijuga* mediante esquejes con diferentes sustratos, el sustrato tierra negra y arena fue el más eficiente, con porcentajes de enraizamiento 53.33% y el 60% respectivamente, lo que los convierte en los tratamientos más exitosos en comparación con los demás.

Palacio et al. (2022) evaluaron el efecto de la inoculación de las PGPR *Bacillus paralicheniformis* y *Pseudomonas lini* en plantas de tomate cultivadas bajo dos preparaciones de suelo, una de ellas con incorporación de composta. Los autores reportaron que *Bacillus paralicheniformis* y *Pseudomonas lini* incrementaron el peso radicular en 119.3 % y 81.9 %, respectivamente, respecto al control no inoculado en el suelo compostado.

Ruiz et al. (2021) evaluaron la capacidad de solubilización de fósforo de 35 aislados nativos de *Pseudomonas fluorescens* provenientes de suelos andisoles, con el objetivo de seleccionar cepas con mayor eficiencia. Los resultados mostraron diferencias significativas entre los aislados, identificándose como más eficientes aquellas con ISF superior a 1.75, siendo el aislado Pf_33 el que presentó el mayor valor. Los autores concluyeron que existe variabilidad en la capacidad de solubilización de fósforo entre las cepas nativas, lo que evidencia su potencial para ser utilizadas como biofertilizantes en la agricultura.

Huwasquiche et al. (2020) caracterizaron y evaluaron el potencial de microorganismos con capacidad PGPR asociados al cultivo de tarwi (*Lupinus mutabilis*) en Perú. Evaluaron la producción de ácido indolacético (AIA), la solubilización de fosfatos, la producción de sideróforos, la fijación de nitrógeno y la promoción del crecimiento vegetal. Los autores identificaron aislamientos bacterianos con alto potencial como biofertilizantes, destacando cepas pertenecientes principalmente a la familia *Bacillaceae*.

Damtew et al. (2019) evaluaron el efecto de diferentes proporciones de vermicompost sobre el crecimiento de plántulas de *Olea europaea* subsp. *cuspidata* en vivero. Los resultados mostraron que el sustrato con 30 % de vermicompost produjo los mejores resultados, incrementando la altura en 21 %, el diámetro del cuello en 26 % y el número de hojas en 23 % respecto al tratamiento control. Los autores destacaron que la incorporación de vermicompost mejora el crecimiento y la calidad de las plántulas en vivero.

Salomon et al. (2017) evaluaron el efecto de *Pseudomonas fluorescens* y *Bacillus licheniformis*, aplicados individualmente o en combinación con extracto de agua de humo, sobre el crecimiento de estacas de *Vitis vinifera*. Los resultados mostraron que la aplicación individual de *Pseudomonas fluorescens*

promovió un incremento en la longitud del tallo respecto al tratamiento control, además de favorecer el desarrollo vegetativo de las estacas. Los autores concluyeron que las PGPR constituyen una alternativa eficaz para estimular el crecimiento inicial y mejorar el establecimiento de estacas de vid.

Zulueta et al. (2015) evaluaron el efecto del hidropriming y biopriming con *Pseudomonas fluorescens*, *Pseudomonas putida* y *Bacillus subtilis* sobre la germinación y el crecimiento de *Abies hickelii* y *Abies religiosa*. Los resultados mostraron que las semillas inoculadas con *Pseudomonas fluorescens* y *P. putida* presentaron un mayor crecimiento de las plántulas respecto al tratamiento control. Los autores concluyeron que la inoculación con PGPR constituye una alternativa eficaz para mejorar el establecimiento inicial de especies forestales.

Atik (2014) evaluó el efecto de diferentes concentraciones de vermicompost sobre el crecimiento de plántulas de pino negro de Anatolia (*Pinus nigra* subsp. *pallasiana*). Los resultados evidenciaron incrementos en la altura de las plántulas de hasta 20 % y en el diámetro del cuello de la raíz de aproximadamente 26 % respecto al tratamiento control. El autor señaló que el vermicompost constituye una alternativa para mejorar la calidad de las plántulas producidas en vivero.

Angulo et al. (2014) caracterizaron rizobacterias rizosféricas y endófitas asociadas a plántulas de *Eucalyptus nitens* con el objetivo de evaluar su capacidad para promover el crecimiento vegetal. De los 105 aislamientos obtenidos, 15 incrementaron significativamente el crecimiento de las plántulas, registrándose aumentos de hasta 50 % en altura y 45 % en longitud radicular. Los autores identificaron cepas con múltiples mecanismos promotores del crecimiento, destacando su potencial para ser utilizadas como inoculantes biológicos en la producción de especies forestales.

Valenzuela (2014) evaluó la propagación vegetativa de *Polylepis incana* mediante la aplicación de tres enraizadores y tres tipos de sustratos en condiciones de vivero en Ecuador. Los resultados mostraron diferencias entre las combinaciones evaluadas; en el desarrollo foliar, el tratamiento con Hormonagro y el sustrato compuesto por tierra negra, arena y humus alcanzó

el mayor promedio con 4.38 folíolos, mientras que la mayor sobrevivencia (33 %) se obtuvo con Radical Fit y tierra de bosque. En general, el estudio evidenció que la combinación del tipo de enraizador y sustrato influyó en el desarrollo de los esquejes.

2.1.2. Antecedentes nacionales

Guadalupe (2026) evaluó las características fisicoquímicas del suelo bajo plantaciones de *Polylepis* sp., *Pinus radiata* y pradera altoandina. Encontró que los suelos bajo *Polylepis* presentaron diferencias en propiedades como conductividad eléctrica, materia orgánica, fósforo, potasio y cationes intercambiables, concluyendo que esta cobertura contribuye al mantenimiento de la fertilidad del suelo en ecosistemas altoandinos.

Bendezú (2025) evaluó el efecto de diferentes dosis del enraizador comercial ROOT-HOR sobre la propagación vegetativa de *Polylepis racemosa* en condiciones de vivero. Los resultados evidenciaron porcentajes de sobrevivencia superiores al 60 % y determinaron una dosis óptima de 6.47 mL, con la cual se estimó una longitud máxima de raíz de 25.98 cm, además de favorecer el crecimiento de los plantones. El autor concluyó que la aplicación de ROOT-HOR mejora el enraizamiento y la calidad de los plantones de *Polylepis racemosa*.

Mamani (2025) evaluó el efecto de diferentes enraizadores y bioestimulantes sobre la propagación vegetativa de *Polylepis incana* en condiciones de vivero. Los resultados mostraron que el tratamiento con Root Hor + Agrocimax obtuvo el mayor porcentaje de prendimiento (91.84 %), una altura de 31.88 cm, una longitud de raíz de 31.26 cm, 1.81 brotes por planta y el mejor índice de calidad de Dickson (0.33). Los autores destacaron que la combinación de enraizadores y bioestimulantes mejora el establecimiento y la calidad de las plántulas de *Polylepis incana*.

Román (2024) evaluó las exigencias edáficas de *Polylepis* spp. en el bosque nativo La Quinua, Pasco, con el objetivo de determinar las propiedades físicas y químicas del suelo asociadas al desarrollo de esta especie. Encontró que *Polylepis* spp. se desarrolla sobre suelos franco arenosos con un pH que varía

entre 5.38 y 8.27, contenidos de materia orgánica entre 0.05 % y 2.45 %, fósforo disponible entre 7.2 y 17.0 ppm y potasio entre 77 y 324 ppm, concluyendo que estas propiedades edáficas constituyen condiciones favorables para el establecimiento y crecimiento de la especie.

Ramos (2024) evaluó el efecto de diferentes dosis de hongos micorrícicos y sustratos orgánicos sobre el enraizamiento de esquejes de *Polylepis* sp. en condiciones de ambiente controlado. Se utilizaron siete tratamientos conformados por suelo agrícola, estiércol bovino y diferentes dosis de micorrizas. Los resultados mostraron que el tratamiento compuesto por suelo agrícola + estiércol obtuvo la mayor longitud de brote (4.14 cm) y el mayor número de hojas (8.50). El autor concluyó que la incorporación de sustratos orgánicos favorece el desarrollo de estructuras relacionadas con el enraizamiento de los esquejes de *Polylepis* sp.

Solórzano (2023) aisló, identificó y caracterizó rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal pertenecientes a los géneros *Pseudomonas* y *Bacillus* asociadas al cultivo de palto (*Persea americana*). Los resultados mostraron que *Bacillus subtilis* incrementó significativamente el número de hojas, el área foliar, el peso fresco de hojas y raíces, así como el peso seco de hojas, tallo y raíces. Además, *Bacillus subtilis* y *Pseudomonas putida* presentaron actividad antagonista frente a *Phytophthora cinnamomi*, evidenciando su potencial como agentes de promoción del crecimiento y control biológico en palto.

Pacco (2022) estudió el efecto del abono orgánico y del extracto de sauce en la propagación de esquejes de queuña (*Polylepis tomentella*) en Apurímac. Los hallazgos expusieron diferencias significativas entre los tratamientos, resaltando la composición de estiércol de ovino + arena + tierra agrícola que tuvo un 65 % de prendimiento y después por humus + estiércol de ovino + arena + tierra agrícola, con 58 %. Esta evidencia resalta la importancia de los sustratos orgánicos en el desarrollo de *Polylepis*.

Quispe (2021) comparó la efectividad de tres enraizadores naturales y un enraizador químico en la propagación vegetativa de esquejes de *Polylepis incana* en condiciones de vivero en Patán, Haquira, Apurímac. El extracto de sauce alcanzó el mayor porcentaje con un 80% de enraizado. A los 90 días, el

enraizador químico Root-Hor presentó el mayor número de hojas (14.73) y también alcanzó 2.75 brotes por esqueje. El estudio concluyó que los enraizadores naturales promovieron la propagación vegetativa de los esquejes y presentaron un efecto comparable al enraizador químico.

Romero (2021) determinó el comportamiento de esquejes de queñua durante propagación vegetativa empleando distintos enraizadores y sustratos, al utilizar agua de coco, humus y arena logró el enraizamiento en un 93.1%, con altura promedio de 5.98 cm y longitud de raíz promedio de 6.34 cm.

Velarde et al. (2021) aislaron e identificaron rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR) asociadas a la rizósfera de *Glandularia clavata* en Arequipa, Perú. Mediante la caracterización morfológica y la tinción de Gram identificaron aislamientos compatibles con bacilos Gram positivos y diplobacilos Gram negativos; posteriormente, el análisis molecular del gen ARNr 16S confirmó la presencia de *Bacillus pumilus*, *Pseudomonas fluorescens* y *Rhodococcus erythropolis*, especies reconocidas por su potencial como bacterias promotoras del crecimiento vegetal.

Dominguez (2020) evaluó la influencia de diferentes composiciones de sustrato sobre la propagación vegetativa por esquejes de *Polylepis incana* con una evaluación a los 30, 60 y 90 días. Los resultados evidenciaron diferencias significativas en variables como el porcentaje de enraizamiento, número de hojas y brotes tuvieron resultados significativos, donde el mejor tratamiento fue T3 (Tierra agrícola+ humus+ arena fina en proporción 2:1:1) a los 90 días después de establecimiento de los esquejes.

Romani (2020) evaluó las propiedades fisicoquímicas de los suelos bajo cobertura de *Polylepis racemosa* en la microcuenca Tulumayo (Junín). Reportó valores de pH entre 5,71 y 5,92, materia orgánica entre 1,66 y 3,20 %, y bajas concentraciones de fósforo disponible (5,43–14,40 mg/kg), concluyendo que estos suelos presentan características propias de ecosistemas altoandinos

Arcos (2017) evaluó el efecto de rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR) sobre la productividad del cultivo de papa, determinando la concentración más adecuada en condiciones de invernadero y campo. Como

resultado, las concentraciones de 1×10^6 y 1×10^8 UFC/mL promovieron el mayor crecimiento. Además, las cepas de *Bacillus* y *Pseudomonas* incrementaron significativamente la productividad y redujeron la incidencia de fitopatógenos. Concluyó que las PGPR constituyen una alternativa eficaz para mejorar el crecimiento, permitiendo reducir el uso de fertilizantes químicos.

Huarhua (2017) evaluó el efecto de enraizadores naturales y tres tipos de sustratos para propagar esquejes de queñua, el enraizador agua de coco logró un alto porcentaje de enraizamiento 85.67%, el sustrato turba y humus obtuvo un buen enraizamiento 73.78%, la interacción entre el enraizador agua de coco y el sustrato turba, arena y humus resultó en el mejor enraizamiento 94.67%. Se determinó que la combinación de agua de coco y un sustrato compuesto por turba, arena y humus optimiza el proceso de propagación vegetativa de *Polylepis* sp.

Llanco (2015) aisló y caracterizó cepas de *Pseudomonas* y *Bacillus* provenientes de la rizósfera de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.), evaluando la producción de ácido indolacético (AIA) y la solubilización de fosfatos como atributos PGPR. Identificó cepas con producción media a alta de AIA y una eficiencia de solubilización de fosfatos de hasta 259 %, seleccionando los aislamientos con mayor potencial promotor del crecimiento vegetal.

Quispe Callisaya (2013) evaluó el efecto de dos enraizantes naturales (extracto de sauce y agua de coco) y tres tipos de sustratos sobre la propagación vegetativa de esquejes de *Polylepis besseri* en condiciones de vivero. Los resultados mostraron que el tratamiento con extracto de sauce presentó el mayor porcentaje de prendimiento (52.22 %), una altura promedio de 13.03 cm y 8.30 hojas por esqueje, mientras que el sustrato compuesto por turba y arena favoreció el desarrollo de los esquejes. El autor concluyó que el uso de enraizantes naturales, en combinación con un sustrato adecuado, mejora la propagación vegetativa de *Polylepis besseri*.

2.1.3. Antecedentes regionales y locales

Yana (2021) estudió el efecto de fitohormonas enraizantes orgánicas y químicas en la propagación vegetativa de esquejes de queñua (*Polylepis tomentella*) en Puno. La autora reportó que la fitohormona química AIB rapid root presentó los mayores resultados, con 76.19 % de establecimiento, 12 raíces, 18.53 cm de longitud radicular, 9 brotes y 3 cm de longitud de brote.

Montesinos et al. (2015) estudió la vegetación de los bosques de *Polylepis incarum* en Lampa, se identifican 83 especies vasculares de 35 familias, siendo las herbáceas, gramíneas, arbustos y árboles las formas de vida predominantes, la composición florística evidenció una riqueza alta a moderada de especies. Las familias que tuvieron mayor representación fueron Rosaceae, Asteraceae, Pteridaceae y Poaceae.

Huamán (2018) estudiaron el bosque de Nuñoa en Puno para determinar el área boscosa mediante la evaluación de diversidad florística, se determinó que la especie predominante es *Polylepis incarum* con una superficie de 825.56 ha y un total de 182 especies, por lo que la zona en estudio debe ser declarada un Área Natural Protegida para la protección y conservación del bosque de *Polylepis*.

2.2. Marco teórico

2.2.1. Generalidades de *Polylepis*

a. Bosques altoandinos y el género *Polylepis*

Los bosques altoandinos constituyen uno de los ecosistemas más particulares y vulnerables de los Andes. Entre sus formaciones más emblemáticas se encuentran los bosques dominados por *Polylepis*, conocidos localmente como “queñuales”. Estas comunidades arbóreas se desarrollan en elevaciones extremas entre aproximadamente 2800 y 4800 msnm, adaptándose a condiciones de bajas temperaturas, suelos pedregosos y precipitaciones variables (Cuyckens y Renison, 2018).

El género *Polylepis* agrupa en total 45 especies distribuidas a lo largo de los Andes sudamericanos, incluyendo países como Argentina, Bolivia, Chile, Colombia, Ecuador, Perú y Venezuela. Estas especies pertenecen a la familia Rosaceae y presenta 24 especies distribuidas en el Perú (Boza & Kessler, 2022). Sin embargo en estos ecosistemas se someten a actividades extractivas, sobrepastoreo, e incendios forestales, lo que ha contribuido a disminuir la distribución potencial y la fragmentación de los bosques andinos (Quispe, 2022).

Según la clasificación propuesta por Boza & Kessler (2022), basada en criterios de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza, se establece un sistema de clasificación para determinar el estado de conservación de las especies el cual se basa en categorías como: Preocupación Menor (LC), Casi Amenazado (NT), Vulnerable (VU), En Peligro (EN) y En Peligro Crítico (CR) y Extinto (EX) Esta clasificación constituye una herramienta fundamental para priorizar acciones de conservación, orientar estrategias de manejo y establecer medidas de protección para las especies amenazadas (IUCN, 2022).

Tabla 1

Estado de conservación de especies del género Polylepis reportadas en Sudamérica.

Especie	Estado de conservación	País
<i>P. multijuga</i>	CR	Perú
<i>P. serrata</i>	VU	Perú
<i>P. albicans</i>	VU	Perú
<i>P. argentea</i>	VU	Perú
<i>P. canoi</i>	EN	Bolivia, Perú
<i>P. pepeí</i>	EN	Bolivia, Perú
<i>P. rodolfo-vasquezii</i>	VU	Perú
<i>P. microphylla</i>	EN	Ec, Perú
<i>P. occidentalis</i>	EN	Perú
<i>P. weberbaueri</i>	VU	Perú
<i>P. flavipila</i>	EN	Perú
<i>P. pilosissima</i>	CR	Perú
<i>P. subsericans</i>	VU	Perú
<i>P. acomayensis</i>	EN	Perú
<i>P. incarum</i>	CR	Bolivia y Perú
<i>P. racemosa</i>	LC	Ecuador y Perú
<i>P. sacra</i>	VU	Perú
<i>P. triacontandra</i>	EN	Bolivia y Perú
<i>P. pallidistigma</i>	VU	Perú
<i>P. rugulosa</i>	VU	Chile y Perú
<i>P. fjeldsaoi</i>	VU	Perú
<i>P. incana</i>	LC	Colombia, Ecuador y Perú
<i>P. tarapacana</i>	NT	Argentina, Bolivia, Chile y Perú

Fuente: Adaptado de Boza y Kessler, 2022.

Su ecología está marcada por su capacidad de sobrevivir en ambientes de alta montaña, haciendo de estos bosques relictos únicos, con una flora y fauna especializada, y cumpliendo funciones ecológicas vitales, como conservación de suelos, regulación hídrica, captura de carbono y provisión de recursos maderables y leñosos para las comunidades locales.

No obstante, los bosques de *Polylepis* están entre los ecosistemas andinos más amenazados, debido a la presión antropogénica: tala, quema, sobrepastoreo, recolección de leña y expansión de la agricultura. Como consecuencia, su regeneración natural es muy limitada lo que hace urgente el desarrollo de técnicas de propagación y restauración adaptadas a sus exigentes condiciones ambientales.

Por ello, la propagación vegetativa mediante esquejes se vuelve una estrategia interesante para generar plántones de *Polylepis* con mayor tasa de éxito. Pero dado que estas especies tienen bajos porcentajes de enraizamiento y establecimiento, se deben optimizar las condiciones de sustrato, inoculación microbiana y manejo para lograr resultados efectivos.

b. Especies de *Polylepis* registradas en Puno

La identificación de las especies del género *Polylepis* presentes en el departamento de Puno se realizó mediante la revisión de monografía de Boza y Kessler (2022). Se analizaron individualmente las descripciones de cada especie, considerando específicamente la sección de distribución y el material examinado; y se seleccionaron aquellas especies que presentan registros explícitos en el departamento de Puno. Donde finalmente, se identificaron un total de siete especies reportadas para esta región.

Tabla 2

Distribución de las especies del género Polylepis registradas en el departamento de Puno

Especie	Localidad
<i>Polylepis canoi</i>	Sandia, Huancasayani entre Abra Aricoma y Limbani
<i>Polylepis pepeii</i>	San Antonio de Putina (Tocko-Tocko)
<i>Polylepis rodolfovasquezii</i>	Sandia, Huancasayani en el camino a Limbani este de Abra Aricoma Puno, Atuncolla (Lago Umayo).
<i>Polylepis incarum</i>	Lago Titicaca (Isla Taquile)
<i>Polylepis triacontandra</i>	Sandia (Cuyocuyo)
<i>Polylepis pallidistigma</i>	Azángaro; Carabaya, distrito de Coasa (Sector Chingo); tramo Macusani-Nuñoa; Melgar (Nuñoa) Huancané; Lampa (Quebrada Metara, Pampa Changanchaca, Inticancha, Cerro Chacapacha, Lamparaquen y zonas cercanas a Chañacahua, Cara-cara y distrito de Palca); San Antonio de Putina (Quilcapuncu y Putina); y Puno (alrededores de la ciudad).
<i>Polylepis tarapacana</i>	El Collao, distrito de Santa Rosa y en áreas ubicadas al suroeste de Ilave.

Fuente: Adaptado de Boza y Kessler, 2022.

c. Clasificación taxonómica

De acuerdo con Boza & Kessler (2022), la clasificación taxonómica del género *Polylepis* es la siguiente:

Reino: Plantae

Subreino: Phanerogamae

División: Angiospermae

Clase: Dicotyledoneae

Orden: Rosales

Familia: Rosaceae

Subfamilia: Rosoidea

Tribu: Sanguisorbeae

Género: *Polylepis*

d. Características botánicas

Las características *morfológicas* del género son:

- **Aspectos generales**

Son especies arbóreas o arbustivas, que alcanzan una altura de 1 a 10 m, en un área geológica dominada por rocas calcáreas (Boza y Kessler, 2022). El género *Polylepis* representa crecen en elevaciones por encima del límite continuo de los árboles entre 1800 y 5200 m.s.n.m. (Mendoza & Cano, 2011).

- **Corteza**

La corteza de *Polylepis* es una de las características distintivas del género. El nombre deriva de las palabras griegas poly (muchos) y lepis (capas), está conformada por un ritidoma membranáceo de tipo papiráceo, que se desprende en capas delgadas de tonalidad rojiza a marrón. Presenta diámetros comprendidos entre 5 a 15 cm (Boza y Kessler, 2022).

- **Ramificación**

Los árboles de *Polylepis* tienen tallos y ramas retorcidos, lo cual podría estar asociado a condiciones ambientales como vientos fuertes, bajas temperaturas y aridez. Las hojas generalmente se agrupan densamente

en la punta de las ramas (Simpson, 1979, citado en Boza y Kessler, 2022).

- **Vainas estipulares**

Las vainas se agrupan en los extremos de los brotes y se mantienen intactas durante varios años en la rama, aun después de la caída de las hojas. Estas adoptan una forma de tubos anidados, uno dentro del otro; la superficie externa es densamente vellosa (Boza y Kessler, 2022).

- **Hojas y folíolos**

Hojas compuestas imparipinnadas, con 1-2 pares de folíolos mide 4,4–4,9 cm × 3,2–4,1 cm. Raquis densamente lanoso. La forma del limbo es obtrulada, la base cuneada y el borde crenado con 8–12 dientes apicalmente agudo a obtuso o ligeramente emarginado; el que presenta un mayor tamaño es el segundo par desde el folíolo terminal con medidas de 2,6–3,3 × 0,7–1,1 cm. La superficie adaxial es glabra; y la superficie abaxial es densamente tomentosa con pelos blanquecinos de 0,4–0,8 mm de longitud mezclados con pelos pannosos (Boza y Kessler, 2022).

- **Inflorescencia y flores**

La inflorescencia se presenta en racimos con 11-13 flores son pedunculares. Las brácteas florales tienen una forma triangular estrecha de 5,9–7,6 mm de longitud y son densamente vellosas en la superficie externa. Las flores son hermafroditas de 5,8–8,2 mm de diámetro, crecen sobre 4 sépalos de forma ovada., verde y densamente vellosa, los estambres son sobresalientes cuenta con 21–23 estambres y los estilos son fimbriados de 3,3–3,8 mm de largo (Boza y Kessler, 2022).

- **Frutos**

Es de forma turbinada, con la región apical más ensanchada, con 2–4 crestas aplanadas irregulares con una serie de espinas que son favorables para la dispersión aérea, la superficie es densamente vellosa. Tiene una longitud de 4,9–5,7 × 3,4–5,7 mm incluyendo las espinas (Boza y Kessler, 2022).

2.2.2. Reproducción de las especies vegetativas

La reproducción es la capacidad de los seres vivos para originar otras especies semejantes, con la finalidad de prevalecer en el tiempo, en el caso de las especies vegetativas existe una diferencia abismal sobre su mecanismo de reproducción, ya que es posible su reproducción sin necesidad de un gameto masculino y femenino, por ello la reproducción en las plantas se denominan sexual y asexual (Seguí, 2011).

a. Reproducción sexual

Este tipo de reproducción se da mediante la fusión de gametos haploides (femenino y masculino), del cual se genera semillas, el proceso de reproducción implica la formación de flores que contienen los órganos sexuales como estambres y pistilos, mediante la polinización a través de viento, insectos y otros se transfieren los órganos a flores de la misma especie (Hartmann et al., 2011).

b. Reproducción asexual

En este tipo de reproducción los gametos no se forman, no existe fecundación, las células mediante divisiones (mitosis) producen la regeneración de la parte vegetativa seleccionada generando individuos idénticos a la planta madre en este proceso, no hay una mezcla de información genética (Hartmann et al., 2011). La reproducción asexual es una alternativa al uso de semillas especialmente en aquellas especies que mantiene problemas asociados a germinación (Ravi et al., 2023).

c. Propagación Vegetativa Asexual

El periodo de propagación de las plantas suele ser un segmento que oscila entre varias semanas para las plantas herbáceas de rápido crecimiento y uno o dos años para las plantas leñosas perennes. La propagación vegetativa se lleva a cabo a partir de una planta individual mediante el empleo de diversas estructuras vegetativas estas incluyen injerto, esqueje, acodo, bulbo, tubérculo y explante. Tras la propagación, los esquejes

enraizados, los acodos o las plantas producidas mediante cultivo de tejidos son trasplantadas a campo (Hartmann et al., 2011).

Huarhua (2017), señala que el género *Polylepis* se reproduce principalmente de dos maneras: la más frecuente es mediante estacas convencionales y también se puede reproducir por acodos. Además, indica que el método más eficiente y recomendable corresponde al empleo de esquejes, también denominados estacas apicales.

d. Propagación por estacas

Las estacas representan porciones de la planta que pueden ser extraídas de diversas partes, ya sea el tallo, la raíz o la hoja, con la finalidad de promover la formación de raíces, este procedimiento se realiza en ambientes que mantienen niveles adecuados de humedad y fertilidad, la premisa fundamental detrás del uso de esquejes radica en estimular el desarrollo de raíces en estas secciones de la planta, lo que permite su posterior enraizamiento exitoso y, en última instancia, su crecimiento como nuevas plantas independientes (Aldaz & Ochoa, 2011).

- **Según el órgano de origen**

Estacas de tallo. Son segmentos de tallo con yemas capaces de originar brotes y raíces adventicias; son los más utilizados en especies leñosas. Los esquejes de tallo pueden clasificarse, además, según su grado de lignificación en herbáceos, semileñosos y leñosos.

Estacas de hoja. Se obtiene al cortar una lámina de hoja y peciolo, esta desarrolla raíces y así da origen a nuevas plántulas.

Estacas de raíz. Es un fragmento de raíz separado de la planta madre con capacidad de desarrollar brotes y formar nuevas plantas (Hartmann et al., 2011).

- **Según la presencia de raíces adventicias**

El enraizamiento de las estacas depende de la formación de raíces adventicias:

Raíces preformadas. Una sección de la rama que muestra protuberancias claramente visibles conocidas como raíces adventicias, estas estructuras son fundamentales en el proceso de propagación de la planta, ya que constituyen puntos de partida para el crecimiento de nuevas raíces, lo que simplifica el proceso de enraizamiento y, en última instancia, favorece la formación de una planta independiente (Aldaz & Ochoa, 2011).

Raíces de lesiones. Sección de la rama que no presenta protuberancias o nódulos visibles, en esta situación, la rama carece de estructuras de raíces adventicias claramente desarrolladas en su superficie, este escenario puede requerir un enfoque distinto en el proceso de propagación vegetativa, ya que la carencia de raíces preexistentes puede implicar un enraizamiento más prolongado o la necesidad de emplear técnicas específicas para estimular el desarrollo de nuevas raíces en esa zona de la planta (Aldaz & Ochoa, 2011).

Druege (2020) señala que la formación de raíces adventicias restablece progresivamente la funcionalidad del esqueje al mejorar el suministro de agua y nutrientes.

e. Acodos

De acuerdo al método empleado los acodos se dividen en:

- **Acodo simple**

Se selecciona una sección de la planta madre y se le imprime una curvatura, a continuación, se procede a enterrarla en un sustrato de textura suelta, el propósito central de este procedimiento es inducir la formación de raíces en la porción que ha sido enterrada, lo que culmina en el desarrollo de una nueva rama autónoma y enraizada.

- **Acodo aéreo**

Se realiza la eliminación de una sección circular de la corteza en una rama o tallo, la cual posteriormente se rodea con un sustrato adecuado, esta técnica se emplea con la finalidad de estimular el desarrollo de raíces en el área donde se realizó la incisión en la corteza.

- **Acodo serpenteado**

Se lesiona la parte inferior del tallo y se cubre de la misma manera que para el acodo simple, sin embargo, en este caso se alterna segmentos enterrados y expuestos de una misma rama. Las raíces se desarrollan en las secciones enterrada, generando múltiples plantas de una sola rama.

- **Acodo en montículo**

Este método implica cubrir o amontonar la base de la planta con tierra u otro medio sustrato para fomentar la formación de raíces en ellos. Este método es favorable para plantas con ramas duras que no se inclinan fácilmente y con alta capacidad de emisión de brotes (Hartmann et al., 2011).

f. Factores que influyen en la propagación por esquejes

Según Ramos (2024), para la propagación a través de estacas existen factores abióticos muy importante como irradiación, temperatura, humedad, sustrato y agregados orgánicos. Asimismo Hartmann et al., (2011), indica que el proceso de enraizamiento de las estacas está influenciado por diversos factores que deben mantenerse en condiciones adecuadas para lograr resultados satisfactorios en cuanto al desarrollo de raíces. Entre los principales factores se encuentran:

- **Selección del material vegetal**

Donde se toma en cuenta la condición de la planta madre como el estado fitosanitario y fisiológico, grado de juvenilidad, el tipo de madera seleccionada, y la época más adecuada para la recolección de las estacas. En el caso del género *Polylepis*, Mamani (2025) menciona que Aragón et al. (2010) recomiendan realizar la recolección de esquejes entre mayo y septiembre para la propagación en vivero, mientras que Fjeldså y Kessler (1996) señalan que la recolección poco después de la época de lluvias constituye una condición más favorable.

- **Tratamiento de las estacas**

Se considera la aplicación de reguladores de crecimiento, el aporte de nutrientes minerales, el uso de fungicidas y la realización de lesiones.

- **Condiciones ambientales**

Durante el enraizamiento donde intervienen factores como la disponibilidad de agua, la temperatura, la luz, humedad y el tipo de sustrato (Hartmann et al., 2011).

Según Ipizia (2011, citado en Pacco, 2022) para la propagación de especies forestales es recomendable recolectar los esquejes en las primeras horas de la mañana cuando los tallos están turgentes. Se preparan conservando las hojas en el extremo superior, pero quitándolas del extremo inferior. Si éstas son muy abundantes se deben reducir para evitar la pérdida de agua. Se sugiere usar esquejes de bosques relictos aislados y de preferencia de lugares húmedos (Hartmann et al., 2011).

En el caso del género *Polylepis*, diversos estudios han demostrado que el uso de enraizadores y sustratos adecuados mejora significativamente el enraizamiento de los esquejes.

2.2.3. Sustrato

El sustrato es el medio de crecimiento utilizado para el cultivo de plantas en contenedores, constituido por materiales orgánicos, inorgánicos o una combinación de ambos, cuya función es proporcionar soporte físico al sistema radicular, favorecer la retención y disponibilidad de agua, mantener una adecuada aireación y facilitar el suministro de nutrientes esenciales para el crecimiento y desarrollo vegetal. (Gruda, 2019) Aunque la turba es un componentes orgánico importantes de las mezclas, también se utilizan muchos otros materiales la elección depende de su disponibilidad, costo y la experiencia local en su uso (Bunt, 2012).

Las estacas de una gran variedad de especies de plantas son capaces de enraizar con facilidad en una gran diversidad de medios, pero en aquellas que lo hacen con dificultad el medio que se use puede tener gran influencia, no solamente en el porcentaje de estacas enraizadas sino también en el sistema radical formado.

a. Componentes del sustrato

Hoyos (2004, como se citó en Huarhua, 2017) el sustrato es la tierra en la cual se desarrollan las plantas y sus componentes pueden ser.

- **Tierra**

Elemento fundamental que puede cambiar en función de las características del contenido nutricional y las condiciones de drenaje al añadirle otros componentes

- **Arena**

Componente que se emplea para optimizar las condiciones de la tierra, con el objetivo de facilitar la filtración de agua y prevenir la solidificación del sustrato.

- **Abono**

Sustancia de origen animal o vegetal que puede o no ser agregado a la tierra o arena (sustrato) para complementar los elementos nutritivos necesarios para un buen desarrollo de la planta. Es un término muy extenso que abarca abonos elaborados con estiércol de ganado, excrementos de otros animales, otros desechos animales, desechos rurales y urbanos, residuos de cultivos.

Su aplicación incrementa el contenido de materia orgánica, mejora la estructura del suelo, favorece la retención de agua, aumenta la capacidad de intercambio catiónico y estimula la actividad microbiana, contribuyendo al crecimiento y desarrollo de las plantas (Liu et al., 2021). Entre los cuales se encuentran los tres tipos de abono los cuales fueron considerados para la presente investigación:

Compost de materia orgánica. El compost es un producto orgánico estable obtenido mediante la descomposición biológica y controlada de residuos orgánicos por la acción de diversos microorganismos, proceso mediante el cual la materia orgánica se transforma en un material estabilizado y apto para mejorar las propiedades del suelo (Binner, 2016). La aplicación de compost mejora las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, incrementando el contenido de materia orgánica, la porosidad, la capacidad de retención de agua, la capacidad

de intercambio catiónico y la actividad microbiana, favoreciendo la fertilidad del suelo y el crecimiento de las plantas (Kranz et al., 2023).

Humus de lombriz. Es un abono orgánico obtenido mediante la descomposición de materia orgánica por la acción conjunta de microorganismos y lombrices, principalmente de la especie *Eisenia fetida*. Este proceso transforma los residuos orgánicos en un material rico en nutrientes y compuestos húmicos, mejorando las propiedades del suelo ya que mantiene una estructura física estable debido a la presencia de macroporos y complejos organominerales que permiten una porosidad adecuada, buena aireación y capacidad de retención de agua. De esta manera facilitan la transferencia de nutrientes para las plantas y contribuyen a su crecimiento. (Gupta et al., 2021).

Estiércol de bovino. Los estiércoles de animales más importantes estudiados son el estiércol de corral bovino el cual proporciona nutrientes disponibles, influye positivamente en las propiedades físicas del suelo y contribuyen a la acumulación de materia orgánica. La aplicación de estiércol puede representar una estrategia de desarrollo sostenible para mejorar la productividad y el rendimiento del suelo, pero es necesario determinar las condiciones óptimas (Du et al., 2020). El estiércol bovino pasteurizado es un material orgánico estabilizado mediante tratamiento térmico que puede ser utilizado como componente de sustratos en la producción de plantas (Font, 2019).

Debido a ciertos componentes de los medios para enraizamiento estos pueden contener organismos patógenos dañinos. Por esta razón, se debe pasteurizar, de preferencia con vapor aireado o con sustancias químicas antes de llevarlos a un área de propagación limpia (Hartmann et al., 2011).

b. Condiciones que afectan la disponibilidad de nutrientes para las plantas

Son factores que influyen en la disponibilidad de nutrientes para las plantas como variables climáticas (temperatura, precipitación y humedad), el pH del suelo, el contenido de materia orgánica, la actividad microbiana, la solubilidad de los nutrientes y el ciclo de nutrientes mediado por

microorganismos, el pH del suelo afecta la disponibilidad de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K); la materia orgánica mejora la estructura del suelo, la retención de agua y la capacidad de intercambio catiónico, lo que en última instancia aumenta la disponibilidad de nutrientes (Khan et al., 2026).

2.2.4. Rizobacterias Promotoras del Crecimiento Vegetal (PGPR)

a. Rizosfera

El suelo alberga numerosas formas de vida microscópicas como bacterias, hongos, actinomicetos, protozoos y algas. De estos diversos microorganismos, las bacterias representan aproximadamente el 95% de la microbiota del suelo. Las bacterias no están distribuidas uniformemente en el suelo, la mayor concentración de estas se encuentra alrededor de las raíces región denominada rizosfera (Glick, 2012).

La rizosfera una zona del ecosistema de suelo que rodea y está bajo la influencia de las raíces de las plantas, donde el rizoplaneo comprende las superficies radiculares y las partículas de suelo fuertemente adheridas. En este contexto, existen muchas especies de bacterias presentes en el suelo que promueven el crecimiento de las plantas mediante la producción de reguladores del crecimiento, la inducción de la exudación radicular y la mejora de la disponibilidad de nutrientes para la planta, además de controlar los patógenos vegetales transmitidos por el suelo (Akhtar et al., 2012).

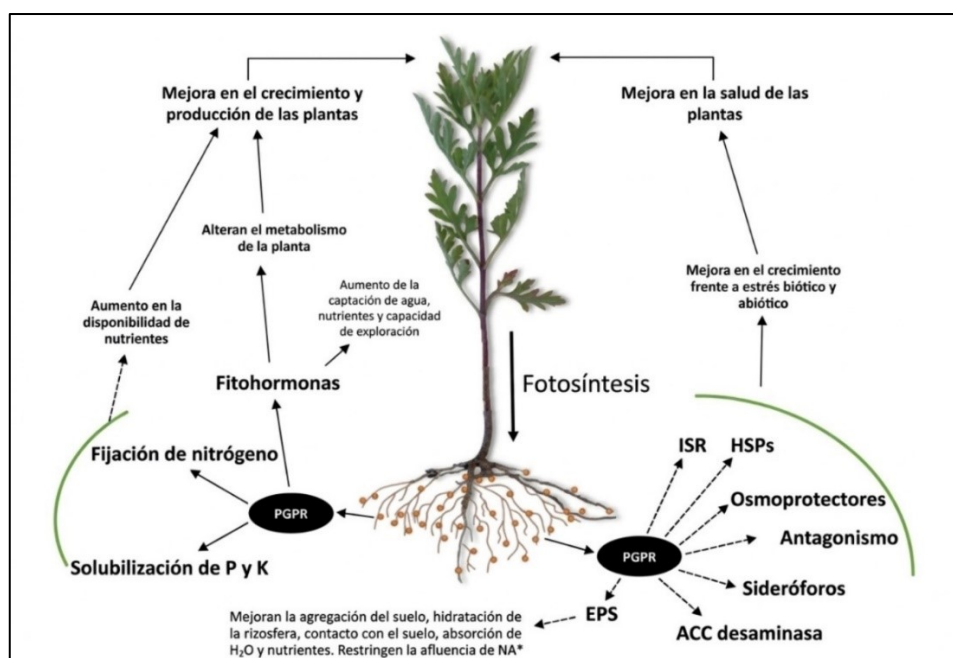
b. Rizobacterias

Las rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR, por sus siglas en inglés) se definen como bacterias que colonizan las raíces, habitan en la rizosfera, ejerciendo un efecto benéfico sobre el desarrollo de las plantas, potenciando el crecimiento de estas a través de la disponibilidad nutrientes esenciales y disminuyendo la probabilidad de que sufran enfermedades (Naik et al., 2023). La rizosfera tiene una microbiota extremadamente diversa, donde solo una fracción específica actúa como PGPR.

Diversos estudios han reportado una amplia diversidad de géneros bacterianos con actividad PGPR como: *Pseudomonas*, *Azotobacter*, *Bacillus*, *Enterobacter*, *Rhizobium*, *Mesorhizobium*, *Bradyrhizobium*, *Acinetobacter*, *Kluyvera*, *Brevibacterium*, *Erwinia*, *Gluconacetobacter*, *Mycobacterium*, *Klebsiella* y *Flavobacterium* (Mohd & Manzoor, 2022). A pesar de las diferencias entre estas bacterias, todas utilizan los mismos mecanismos. En una revisión sistemática Posada et al., (2021) identificaron 63 géneros distintos, siendo *Bacillus* y *Pseudomonas* los más frecuentemente estudiado.

Figura 1

Interrelaciones rizobacterias y especies vegetativas.



Fuente: Velasco et al., 2020.

c. Mecanismos de Acción de las PGPR

Las PGPR pueden promover el crecimiento de las plantas mediante mecanismos directos, facilitando la adquisición de nutrientes y modulando los niveles de fitohormonas, o mediante mecanismos indirectos, reduciendo los efectos de los fitopatógenos sobre el crecimiento y desarrollo vegetal al actuar como agentes de biocontrol (Reed & Glick, 2023)

- **Mecanismos directos**

Estos mecanismos actúan directamente sobre la fisiología de la planta, modificando su crecimiento, absorción de nutrientes y desarrollo morfológico:

Fijación del nitrógeno. EL N_2 constituye aproximadamente el 78% de los gases en la atmósfera; sin embargo, esta forma no es asimilable por las plantas. La fijación biológica del nitrógeno es el proceso mediante el cual bacterias diazotróficas, tanto simbióticas como de vida libre o asociativas, convierten el nitrógeno atmosférico en amonio (NH_4^+) mediante la acción de la enzima nitrogenasa el cual puede ser absorbido por las raíces y utilizado en el metabolismo vegetal (Alzate et al., 2024).

Solubilización de fosfatos. El 95-99% del fosfato se encuentra en forma insoluble, inmovilizada y precipitada, a las plantas les resulta difícil absorberlo. La solubilización y mineralización del fósforo por bacterias solubilizadoras de fosfato es una característica importante que pueden lograr las rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR). Estas bacterias secretan diferentes tipos de ácidos orgánicos lo que reduce el pH en la rizosfera y por reacciones químicas son capaces de convertir el fosfato tricalcico $Ca_3(PO_4)_2$ en fosfato di y monobásicos asimilables para las plantas (Prasad et al., 2019).

Solubilización de potasio. El potasio es un nutriente esencial que las plantas necesitan para crecer bien, ayuda en muchas cosas importantes, como la fotosíntesis. Dado que más del 90 % del potasio se encuentra en forma de minerales insolubles, como rocas y silicatos, la concentración de potasio soluble suele ser muy baja en el suelo. A tal efecto las PGPR liberan potasio en una forma accesible a partir de minerales potásicos en suelos (Liu et al., 2012).

Producción de fitohormonas. Las fitohormonas regulan el crecimiento y desarrollo de las plantas y desempeñan un papel fundamental en su adaptación y supervivencia frente a diferentes tipos de estrés. En relación con ello, algunas rizobacterias tienen la capacidad de producir o modular fitohormonas, como auxinas, citocininas, giberelinas, ácido salicílico y etileno, favoreciendo el crecimiento y la

respuesta de las plantas ante condiciones ambientales adversas (Orozco et al., 2023).

Citoquininas y giberelinas. La función de las citoquininas y giberelinas producidas por bacterias se fundamenta en estudios fisiológicos realizados en plantas, en los cuales se aplicaron hormonas purificadas de manera exógena durante su crecimiento (Prasad et al., 2019).

Auxinas. El ácido indol-3-acético también conocido como ácido indolacético (AIA) es la auxina más común. El AIA afecta la división, elongación y diferenciación de las células vegetales; aumenta la tasa de desarrollo del xilema y las raíces; controla los procesos de crecimiento vegetativo; inicia la formación de raíces laterales y adventicias. De igual manera interviene en la fotosíntesis y la resistencia a condiciones de estrés (Spaepen et al., 2011). Sin embargo, además del AIA, las plantas sintetizan otros tres compuestos comúnmente considerados como “auxinas endógenas”: ácido 4-cloroindol-3-acético (4-Cl-AIA), ácido indol-3-butírico (AIB) y ácido fenilacético (APA) y para las auxinas sintéticas ácido 2,4-diclorofenoxiacético (2,4-D) y ácido naftaleno-1-acético (ANA) (Simon & Petrášek, 2011).

Etileno. Puede afectar el crecimiento y desarrollo de las plantas de muchas maneras diferentes, incluyendo la promoción de la iniciación de raíces, la inhibición de la elongación de raíces, la promoción de la maduración de frutos, la promoción del marchitamiento de flores, la estimulación de la germinación de semillas, la promoción de la abscisión de hojas, la activación de la síntesis de otras hormonas vegetales (Glick, 2012).

- **Mecanismos indirectos**

Además de la acción directa, las PGPR pueden favorecer el crecimiento de plantas mediante efectos indirectos, que mejoran las condiciones del suelo o la salud de la planta frente a estrés biótico o abiótico:

Control de estrés. Debido a su condición de organismos que permanecen fijos al suelo, el crecimiento de las plantas puede verse inhibido por una gran cantidad de diferentes estreses bióticos y abióticos. Cuando se añaden a las plantas PGPR pueden emplear una

o varias estrategias mecánísticas diferentes en un esfuerzo por superar esta inhibición del crecimiento (Glick, 2012).

Resistencia sistémica inducida (ISR). Ocurre cuando las plantas activan sus mecanismos de defensa en respuesta a la infección por un agente patógeno (Glick, 2012).

Proteínas de choque térmico. Conocidas como proteínas de choque térmico (HSPs: *Heat Shock Proteins*) su principal función es la protección de otras proteínas que son afectadas por las altas temperaturas (>40 °C) (Velasco et al., 2020).

Osmoprotectores. Las PGPR secretan osmolitos en respuesta al estrés por sequía, que actúan sinérgicamente con los osmolitos producidos por la planta. Estas moléculas mantienen el balance de los fluidos en las células e impulsan el crecimiento vegetal en circunstancias adversas (Vurukonda et al., 2016).

Antagonismo. Se refiere a la capacidad de estos microorganismos para inhibir el crecimiento o la actividad de patógenos del suelo mediante la producción de compuestos como antibióticos, sideróforos y metabolitos secundarios, contribuyendo así a la protección de la planta (Beneduzi et al., 2012).

Producción de sideróforos. Algunas PGPR producen sideróforos, compuestos de bajo peso molecular con alta afinidad por el hierro férrico (Fe^{3+}), que quelan este elemento y aumentan su disponibilidad para las plantas. Al mismo tiempo, disminuyen la cantidad de hierro libre en la rizósfera, limitando su disponibilidad para diversos fitopatógenos limitando así su capacidad de proliferación (Igiehon et al., 2024).

ACC Desaminasa. Las plantas suelen responder a la presencia de fitopatógenos sintetizando etileno de estrés. El ACC (ácido 1-aminociclopropano-1-carboxilato) es el precursor inmediato de la síntesis del etileno en las plantas. Las rizobacterias que pueden generar la enzima ACC desaminasa favorecen y asisten el crecimiento y desarrollo de las plantas en condiciones de estrés (Velasco et al., 2020).

Producción de exopolisacáridos. Las rizobacterias liberan exopolisacáridos (EPS) y formar biopelículas en la raíz, dentro de ella

se protege a la planta del estrés externo. Además, los EPS funcionan como moléculas señal que activan la respuesta de defensa durante el proceso de infección de patógenos (Velasco et al., 2020).

Entre los principales mecanismos de acción de las PGPR se encuentran la producción de AIA y la solubilización de fosfato (Posada et al., 2021), los cuales fueron tomados como base para el desarrollo de la presente investigación, en función de su importancia en la promoción del crecimiento.

d. Importancia de las cepas nativas y la diversidad bacteriana en la rizósfera

Las bacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR) favorecen el desarrollo de las plantas mediante diversos mecanismos; sin embargo, su eficacia como bioinoculantes depende de su capacidad para colonizar la rizósfera, establecerse y competir con la microbiota nativa después de la inoculación. Por ello, la selección de cepas adaptadas a las condiciones ambientales donde serán utilizadas constituye un factor determinante para maximizar su eficiencia (Igiehon et al., 2024). Las cepas nativas representan una alternativa de especial interés porque se encuentran naturalmente adaptadas a las condiciones edáficas, climáticas y biológicas del ecosistema del cual fueron aisladas. Esta adaptación incrementa su capacidad de establecerse en la rizósfera, interactuar con la planta hospedera y mantener un mejor desempeño como bioinoculantes en comparación con microorganismos procedentes de otros ambientes (Cordero et al., 2024).

La composición de la microbiota rizosférica no es uniforme, ya que está influenciada por los exudados radicales, las características fisicoquímicas del suelo y las condiciones ambientales, factores que regulan el reclutamiento y establecimiento de comunidades microbianas específicas alrededor de las raíces (Feng et al., 2024). Incluso individuos pertenecientes a una misma especie pueden albergar microbiotas rizosféricas con composición y abundancia diferentes. En este sentido, el muestreo de varios árboles incrementa la probabilidad de recuperar una mayor diversidad bacteriana y, por consiguiente, aumenta las

posibilidades de identificar cepas con potencial promotor del crecimiento vegetal (Kindtler et al., 2025).

En la presente investigación, el aislamiento de *Bacillus* sp. y *Pseudomonas* sp. se realizó directamente a partir de la rizósfera de árboles de *Polylepis* sp. del mismo bosque del cual se obtuvieron los esquejes. Esta estrategia permitió trabajar con cepas nativas adaptadas a las condiciones ecológicas del área de estudio y mantener correspondencia entre el origen del microorganismo y el material vegetal empleado durante la inoculación, incrementando la probabilidad de establecer interacciones compatibles entre ambos (Cordero et al., 2024).

e. Géneros *Bacillus* y *Pseudomonas*

Los géneros bacterianos *Bacillus* y *Pseudomonas* han demostrado su capacidad para promover el crecimiento y establecimiento de diversas especies forestales mediante la expresión de múltiples mecanismos PGPR. Ambos géneros son considerados algunos de los microorganismos más utilizados en programas de producción de plantas forestales y restauración ecológica. Por ello, en la presente investigación se emplearon cepas pertenecientes a estos géneros debido a su reconocida eficiencia en la promoción del crecimiento vegetal (Kotiyal & Sharma, 2024).

• Efecto promotor del crecimiento vegetal del género *Pseudomonas*

Todas las especies y cepas de *Pseudomonas* son bacilos Gram negativos (Akhtar et al., 2012). Estas presentan una rápida colonización de la rizósfera y una elevada capacidad para producir fitohormonas, sideróforos, compuestos antimicrobianos y otros metabolitos que favorecen el crecimiento vegetal y la protección frente a enfermedades, razón por la cual constituyen uno de los grupos de PGPR más utilizados en programas de agricultura sostenible (Wang et al., 2024). Por lo que resulta importante detallar su clasificación taxonómica:

Dominio: Bacteria

Phylum: Proteobacterias

Clase: Gammaproteobacterias

Orden: Pseudomonadales

Familia: Pseudomonadaceae

Género: *Pseudomonas* (Peix et al., 2018)

En el caso del género *Pseudomonas*, se han identificado especies como *Pseudomonas fluorescens*, *Pseudomonas putida* y *Pseudomonas aeruginosa* como PGPR, las cuales presentan mecanismos como la producción de sideróforos, fitohormonas y actividad antagonista (Ahemad & Kibret, 2014).

- **Efecto promotor del crecimiento vegetal del género *Bacillus***

El género *Bacillus* se encuentra bien adaptado a la rizosfera de muchas plantas (Solórzano, 2023). Entre la diversidad bacteriana presente en la rizósfera este género destaca por su elevada capacidad de colonización, formación de endosporas, producción de metabolitos relacionados con la promoción del crecimiento vegetal y el control biológico de fitopatógenos, características que han favorecido su empleo como bioinoculante en diferentes cultivos (Sharma et al., 2025). La clasificación taxonómica del género *Bacillus* es la siguiente:

Dominio: Bacteria

Phylum: Firmicutes

Clase: Bacilli

Orden: Bacillales

Familia: Bacillaceae

Género: *Bacillus* (Logan & De Vos, 2009)

Dentro del género *Bacillus* destacan especies como *Bacillus subtilis* y *Bacillus cereus*, reconocidas por su capacidad antagonista y compuestos que favorecen el crecimiento vegetal (Ahemad & Kibret, 2014).

f. Método para la identificación de rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal

Los métodos tradicionales para la identificación de PGPR incluyen el cultivo de microorganismos mediante diversos métodos de enriquecimiento selectivos y no selectivos, seguidos de confirmación bioquímica, entre otros (Sahni & Prasad, 2021).

- **Caracterización de microorganismos**

Los caracteres morfológicos comprenden aquellas observaciones realizadas a nivel de morfología colonial correspondiente a las características macroscópicas observadas en cultivos desarrollados en medios sólidos tales como:

Tamaño. Diámetro en mm. o puntiforme

Forma. Circular, irregular, rizoide.

Borde. Entero, ondulado, lobulado, dentado, rizoide.

Color. Color del pigmento (muy dependiente del medio)

Superficie. Lisa, rugosa, opaca, brillante.

Consistencia. Cremosa, viscosa, granular.

Elevación. Plana, elevada, convexa, umbonada.

Por otro lado, también incluye las características microscópicas, incluyendo la reacción a la tinción Gram, la forma, tamaño y disposición, motilidad, así como la presencia de estructuras especializadas como endosporas, cápsulas y flagelos. Lo que contribuye a una identificación más precisa (Harrigan & McCance, 1966).

g. Rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR) y su potencial en propagación

Además del agua y la temperatura, los nutrientes son el factor ambiental que más limita el crecimiento de las plantas terrestres y las rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR) favorecen el crecimiento de las plantas al aumentar la disponibilidad o la absorción de nutrientes de un reservorio limitado en el suelo (Prasad et al., 2019). En los últimos años,

han emergido como una herramienta biotecnológica prometedora para mejorar el enraizamiento y vigor de plántulas. Vejan et al. (2016). Diversos estudios han demostrado que la eficacia de las rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR) puede incrementarse significativamente cuando se combinan con enmiendas orgánicas o sustratos como compost, biochar o vermicompost. Estas enmiendas no solo actúan como fuente de carbono y energía para los microorganismos, sino que también mejoran las condiciones del sustrato al aumentar la retención de agua, estabilizar el pH y proporcionar microhábitats que favorecen la supervivencia bacteriana. Asimismo, tras su establecimiento, las PGPR contribuyen a la liberación de nutrientes disponibles y compuestos bioactivos que estimulan el crecimiento vegetal y mejoran la fertilidad del suelo, generando un efecto sinérgico en el desarrollo de las plantas (Wang & Xu, 2026).

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Hipótesis planteadas

3.1.1. Hipótesis general

Los sustratos enriquecidos con cepas de rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR) influyen significativamente en la propagación vegetativa de esquejes de *Polylepis* sp. en la localidad de Palca, Puno.

3.1.2. Hipótesis específicas

- En la rizósfera del bosque andino de *Polylepis* sp. de la localidad de Palca, Puno, existen cepas de rizobacterias con características compatibles con bacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR), pertenecientes a los géneros *Bacillus* y *Pseudomonas*.
- El enriquecimiento de los sustratos con cepas nativas de rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal permite su adecuada incorporación y establecimiento en los tratamientos experimentales.
- Los sustratos enriquecidos con cepas de *Bacillus* sp. y *Pseudomonas* sp. incrementan significativamente el porcentaje de enraizamiento y mejoran el desarrollo vegetativo de los esquejes de *Polylepis* sp.

3.2. Tipo de investigación:

El estudio corresponde al tipo aplicado según su finalidad, debido a que está orientado a generar una solución técnica frente a un problema concreto relacionado con la baja eficiencia en la propagación vegetativa de esquejes de *Polylepis* sp. En ese sentido, la presente investigación propone el uso de sustratos enriquecidos con cepas de rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal como estrategia para mejorar el enraizamiento y desarrollo inicial de esquejes en condiciones de vivero.

3.3. Enfoque de investigación

La investigación tuvo un enfoque cuantitativo, porque se recolectaron datos numéricos de las variables de respuesta y se analizaron mediante métodos estadísticos para determinar el efecto de los sustratos y las rizobacterias sobre la propagación vegetativa de *Polylepis* sp.

3.4. Alcance de investigación

El estudio presenta un alcance explicativo, puesto que no solo describe el comportamiento de las variables, sino que busca determinar si existe una relación de causa-efecto entre el enriquecimiento biológico del sustrato y la respuesta fisiológica de los esquejes.

3.5. Diseño de investigación

El diseño de investigación es experimental, ya que se manipulan deliberadamente las variables independientes para observar su efecto sobre variables de respuesta. Donde, se evaluaron distintos tipos de sustrato inoculados con cepas bacterianas en diferentes concentraciones, analizando su influencia sobre el porcentaje de enraizamiento, altura, longitud de raíz, número de brotes y foliolos de esquejes de *Polylepis* sp.

El experimento se estableció bajo un Diseño en Bloques Completamente al Azar (DBCA), con arreglo factorial de 2 factores (AxB), con cuatro niveles para el factor sustrato y siete niveles para el factor inoculación con PGPR. Cada bloque estuvo conformado por 28 tratamientos experimentales, de esta manera se controló la variabilidad ambiental entre filas en el área experimental.

3.5.1. Factores

Factor A: Tipo de sustrato

Con 4 niveles:

A1 = 2 humus de lombriz + ½ arena + 3 tierra agrícola

A2 = 2 estiércol de bovino + ½ arena + 3 tierra agrícola

A3 = 2 compost de materia orgánica + ½ arena + 3 tierra

A4 = Tierra agrícola

Factor B: Inoculación con PGPR

Con 7 niveles:

B1 = *Pseudomonas* sp. (10^4 UFC/mL)

B2 = *Pseudomonas* sp. (10^6 UFC/mL)

B3 = *Pseudomonas* sp. (10^8 UFC/mL)

B4 = *Bacillus* sp. (10^4 UFC/mL)

B5 = *Bacillus* sp. (10^6 UFC/mL)

B6 = *Bacillus* sp. (10^8 UFC/mL)

B7 = Control (sin inoculación)

3.5.2. Modelo matemático

El modelo matemático fue el siguiente:

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + b_k + \varepsilon_{ijk}$$

Donde:

- μ : media general del experimento.
- α_i : efecto del i-ésimo nivel del factor Sustrato ($i = 1, 2, 3$ y 4), correspondientes a humus de lombriz (HL), estiércol bovino (EB), compost de materia orgánica (CM) y tierra agrícola (TA).
- β_j = efecto del j-ésimo nivel del factor Tratamiento bacteriano ($j = 1, 2, \dots, 7$), correspondientes a *Pseudomonas* sp. (1×10^4 , 1×10^6 y 1×10^8 UFC/mL), *Bacillus* sp. (1×10^4 , 1×10^6 y 1×10^8 UFC/mL) y un tratamiento testigo sin inoculación.
- $(\alpha\beta)_{ij}$: efecto de la interacción entre el tipo de sustrato y el tratamiento bacteriano.
- b_k : efecto del k-ésimo bloque ($k = 1, 2, \dots, 8$), correspondiente a la distribución de las unidades experimentales dentro de la cama de propagación del vivero.
- ε_{ijk} : error experimental asociado a cada observación, con distribución normal, media igual a cero y varianza constante.

3.5.3. Variables de estudio

En el presente apartado se describen las variables de estudio.

Tabla 3

Descripción de variables en estudio

Tipo de variable	Variable	Indicador	Unidad	Niveles
Variable Independiente	Tipo de sustrato	Composición del sustrato	—	HL: Humus de lombriz + arena + tierra agrícola (2:½:3) EB: Estiércol de bovino + arena+ tierra agrícola (2:½:3) CM: Compost de materia orgánica+ arena+ tierra (2:½:3) TA: Tierra agrícola
	Cepas de rizobacterias (PGPR)	Tipo de rizobacteria Dosis bacteriana	— UFC/m L	<i>Pseudomonas</i> <i>Bacillus</i> 1×10^4 1×10^6 1×10^8 0 Control (sin inoculación)
	Enraizamiento	Porcentaje de esquejes enraizados	%	—
Variable Dependiente	Número de brotes	Brotes por esqueje	Nº	—
	Altura de planta	Longitud desde la base al ápice	Cm	—
	Longitud de raíz	Longitud de la raíz principal	Cm	—
	Número de folíolos	Conteo de folíolos por esqueje	Nº	—

Fuente: Elaboración propia, 2025.

3.5.4. Tratamientos experimentales

Los tratamientos evaluados en el experimento se presentan a continuación donde se detalla la combinación de los diferentes sustratos y concentraciones de cepas de rizobacterias. Asimismo, el tratamiento T28 correspondió al testigo total el cual no recibió inoculación y estuvo conformado únicamente por tierra agrícola.

La asignación de los tratamientos se realizó de manera aleatoria, con el fin de reducir el error experimental y asegurar que todas las unidades experimentales tuvieran la misma probabilidad de recibir cualquiera de los tratamientos. Las variables de respuesta evaluadas fueron porcentaje de enraizamiento, altura, longitud de raíz, número de brotes y número de folíolos.

Tabla 4*Descripción de tratamientos*

Tratamiento	Sustrato	Rizobacteria	Descripción de tratamientos
T1	A1 (HL)	B1	2 Humus de lombriz + 1/2 arena+ 3 tierra agrícola + <i>Pseudomonas</i> 1×10 ⁴ UFC/mL
T2	A1 (HL)	B2	2 Humus de lombriz + 1/2 arena+ 3 tierra agrícola + <i>Pseudomonas</i> 1×10 ⁶ UFC/mL
T3	A1 (HL)	B3	2 Humus de lombriz + 1/2 arena+ 3 tierra agrícola + <i>Pseudomonas</i> 1×10 ⁸ UFC/mL
T4	A1 (HL)	B4	2 Humus de lombriz + 1/2 arena+ 3 tierra agrícola + <i>Bacillus</i> 1×10 ⁴ UFC/mL
T5	A1 (HL)	B5	2 Humus de lombriz + 1/2 arena+ 3 tierra agrícola + <i>Bacillus</i> 1×10 ⁶ UFC/mL
T6	A1 (HL)	B6	2 Humus de lombriz + 1/2 arena+ 3 tierra agrícola + <i>Bacillus</i> 1×10 ⁸ UFC/mL
T7	A1 (HL)	B7	2 Humus de lombriz + 1/2 arena+ 3 tierra agrícola + Control (sin inoculación)
T8	A2 (EB)	B1	2 Estiércol de bovino+ 1/2 arena+ 3 tierra agrícola + <i>Pseudomonas</i> 1×10 ⁴ UFC/mL
T9	A2 (EB)	B2	2 Estiércol de bovino+ 1/2 arena+ 3 tierra agrícola + <i>Pseudomonas</i> 1×10 ⁶ UFC/mL
T10	A2 (EB)	B3	2 Estiércol de bovino+ 1/2 arena+ 3 tierra agrícola + <i>Pseudomonas</i> 1×10 ⁸ UFC/mL
T11	A2 (EB)	B4	2 Estiércol de bovino+ 1/2 arena+ 3 tierra agrícola + <i>Bacillus</i> 1×10 ⁴ UFC/mL
T12	A2 (EB)	B5	2 Estiércol de bovino+ 1/2 arena+ 3 tierra agrícola + <i>Bacillus</i> 1×10 ⁶ UFC/mL
T13	A2 (EB)	B6	2 Estiércol de bovino+ 1/2 arena+ 3 tierra agrícola + <i>Bacillus</i> 1×10 ⁸ UFC/mL
T14	A2 (EB)	B7	2 Estiércol de bovino+ 1/2 arena+ 3 tierra agrícola + Control (sin inoculación)
T15	A3 (CM)	B1	2 Compost de materia orgánica + 1/2 arena + 3 tierra + <i>Pseudomonas</i> 1×10 ⁴ UFC/mL
T16	A3 (CM)	B2	2 Compost de materia orgánica + 1/2 arena + 3 tierra + <i>Pseudomonas</i> 1×10 ⁶ UFC/mL
T17	A3 (CM)	B3	2 Compost de materia orgánica + 1/2 arena + 3 tierra + <i>Pseudomonas</i> 1×10 ⁸ UFC/mL

Tratamiento	Sustrato	Rizobacteria	Descripción de tratamientos
T18	A3 (CM)	B4	2 Compost de materia orgánica + 1/2 arena + 3 tierra + <i>Bacillus</i> 1×10 ⁴ UFC/mL
T19	A3 (CM)	B5	2 Compost de materia orgánica + 1/2 arena + 3 tierra + <i>Bacillus</i> 1×10 ⁶ UFC/mL
T20	A3 (CM)	B6	2 Compost de materia orgánica + 1/2 arena + 3 tierra + <i>Bacillus</i> 1×10 ⁸ UFC/mL
T21	A3 (CM)	B7	2 Compost de materia orgánica + 1/2 arena + 3 tierra + Control (sin inoculación)
T22	A4 (TA)	B1	Tierra Agrícola + <i>Pseudomonas</i> 1×10 ⁴ UFC/mL
T23	A4 (TA)	B2	Tierra Agrícola + <i>Pseudomonas</i> 1×10 ⁶ UFC/mL
T24	A4 (TA)	B3	Tierra Agrícola + <i>Pseudomonas</i> 1×10 ⁸ UFC/mL
T25	A4 (TA)	B4	Tierra Agrícola + <i>Bacillus</i> 1×10 ⁴ UFC/mL
T26	A4 (TA)	B5	Tierra Agrícola + <i>Bacillus</i> 1×10 ⁶ UFC/mL
T27	A4 (TA)	B6	Tierra Agrícola + <i>Bacillus</i> 1×10 ⁸ UFC/mL
T28	A4 (TA)	B7	Tierra Agrícola + Control (sin inoculación)

Fuente: Elaboración propia, 2025.

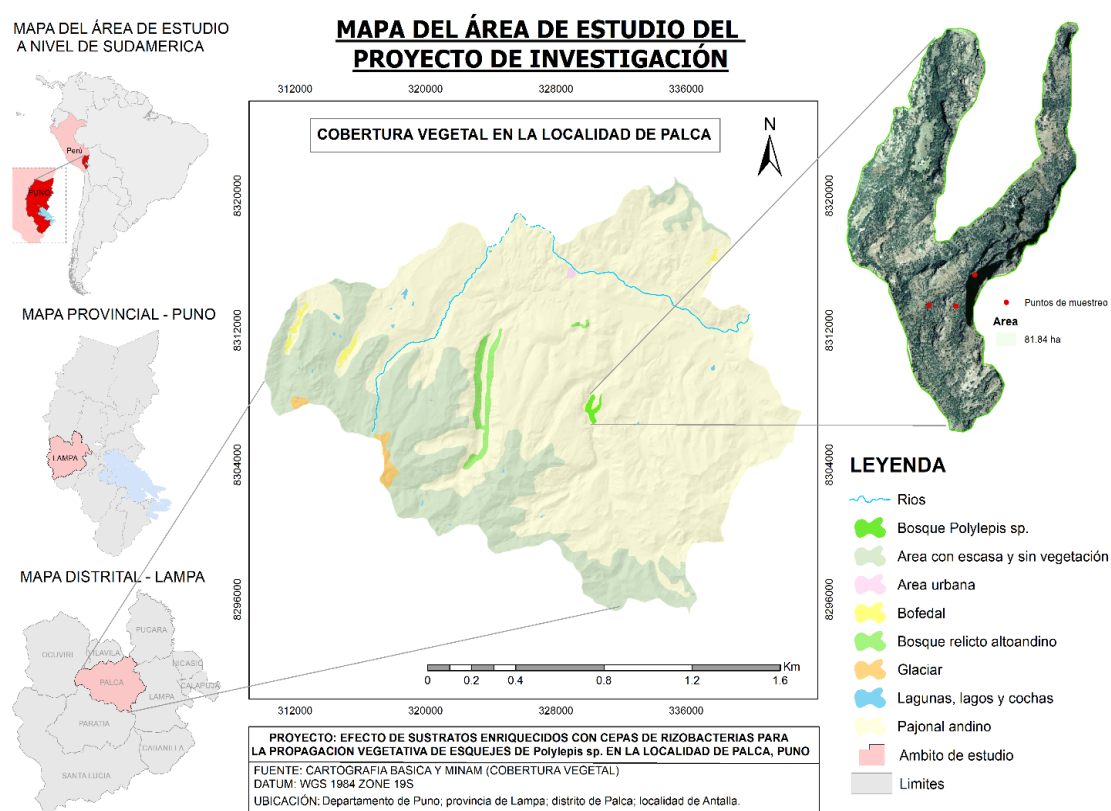
Se establecieron 28 tratamientos, producto de la combinación de los niveles de ambos factores, cada uno con 8 repeticiones por cada tratamiento, constituyendo un total de 224 unidades experimentales.

3.6. Área de estudio

El bosque de *Polylepis* sp. en Antalla se encuentra ubicado en la localidad de Palca, provincia de Lampa, el distrito de Palca abarca una extensión territorial de 483.96 km², se encuentra en las coordenadas 15° 18' 48" S y 70° 35' 13" O, a una altitud de 4068 msnm y la fase experimental de propagación se llevó a cabo a nivel de vivero (UTM 19L 328655 E – 8354987.97 S).

Figura 2

Área de estudio del proyecto de investigación



Fuente: Elaboración propia mediante ArcGIS y Google Earth, 2025.

3.7. Población y muestra

3.7.1. Población

La población estará conformada por el bosque relicto altoandino de la comunidad de Antalla, en la localidad de Palca que tiene una extensión territorial 81.84 ha, en la provincia de Lampa, departamento de Puno. La investigación consideró dos poblaciones de estudio: a) El suelo del bosque de *Polylepis* sp., de donde se obtuvieron cepas nativas de rizobacterias, y b) Los árboles de *Polylepis* sp. de los cuales se recolectaron esquejes.

3.7.2. Muestra

La muestra estará compuesta por todos los individuos leñosos pertenecientes a la familia Rosaceae, género *Polylepis*, especie *Polylepis* sp. que conforman el bosque relicto altoandino de Palca, la técnica de muestreo es no probabilística ya que se seleccionaran árboles leñosos o madre del género.

Para las muestras de suelo se recolectaron muestras representativas de suelo rizosférico en el bosque andino de Palca, para ello se seleccionaron 3 árboles de manera aleatoria y a una profundidad de 20 cm se recolectó 500 g de suelo rizosférico de cada uno de ellos, estas muestras se constituyeron por raíces y suelo adherido a estas (Lara et al., 2011). Posteriormente, las muestras se almacenaron en bolsas herméticas, fueron rotuladas y transportadas al laboratorio en un cooler, manteniéndolas en condiciones de refrigeración con bolsas de gel pack para el aislamiento microbiológico respectivo.

La muestra de vegetal estuvo conformada por 224 esquejes, los cuales demostraron condiciones sanitarias adecuadas y características fenotípicas del género distribuidos en los diferentes tratamientos experimentales.

3.8. Materiales y reactivos

3.8.1. Materiales

Gel pack, cooler, tubos de ensayo, vaso de precipitados 500 mL, piseta, probeta, matraz Erlenmeyer de 250 mL, bolsas herméticas, placas Petri, goteros, bolsas de polietileno de 20x10 cm, repicador, pala, tijeras de podar, asas estériles, regla metálica, frascos de 50 mL y asa de Kolle.

3.8.2. Equipos

Microscopio electrónico - ZEISS Primostar 3, balanza electrónica, baño maría, tamizadora, estufa, centrifugadora, autoclave, vortex mixer, incubador con agitación orbital y GPS - eTrex 10 – Garmin.

3.8.3. Reactivos

Agar King B 500 g, agua peptonada 500 g, agar nutritivo 500 g, cloruro ferrico 0.5M, ácido sulfúrico (H₂SO₄) 100 mL, solución salina fisiológica (0.85% NaCl), agar Pikovskaya 500 g, Tripticasa de soya (TSB) 500 g, L-triptófano 25 g y agua destilada

3.8.4. Insumos

Humus de lombriz, compost de materia orgánica, estiércol de bovino, tierra agrícola, arena y esquejes de *Polylepis* sp.

3.9. Aislamiento e identificación de cepas de rizobacterias promotoras de crecimiento vegetal asociadas al bosque andino de *Polylepis* sp. en la localidad de Palca, Puno

Se recolectaron muestras representativas de suelo rizosférico en el bosque relicto de *Polylepis* sp. de Antalla, Palca se tomó 500 g de muestra para el aislamiento. A partir de las muestras de suelo, se aislaron e identificaron cepas con características PGPR del género *Pseudomonas* y *Bacillus*, cuya identificación se realizó a nivel de género.

3.9.1. Recuento y aislamiento de rizobacterias del género *Pseudomonas* y *Bacillus*

Las muestras de suelo en laboratorio se tamizaron para liberarlas de impurezas y se diluyó 10 g de suelo en 90 mL de agua peptonada, se llevó a homogenización durante 15 minutos con una agitación de 150 rpm. (Solórzano, 2023). Posterior a ello, se tomó 1 mL de cultivo y se inoculó en un tubo contenido de 9 ml de solución salina estéril NaCl al 0.85%. Se prepararon diluciones seriadas de 10⁻² a 10⁻⁶ con la finalidad de realizar el recuento de las rizobacterias. Los medios de cultivo fueron específicos, para *Pseudomonas* se empleó agar King B, al cual también se debe adicionar glicerol en su preparación y para el género *Bacillus* se empleó agar nutritivo, estos medios fueron preparados según las instrucciones del fabricante, donde cada medio fue

esterilizado en autoclave a 15 psi (121 °C) durante 15 minutos y se vertió en las placas Petri en condiciones de asepsia, con un volumen aproximado de 20 mL para cada placa (González et al., 2022).

Posteriormente, solidificado el medio de cultivo se realizó el aislamiento, con ayuda de un gotero se pipeteó 100 µL a los medios de cultivo y se distribuyó en placas de Petri con las diluciones 10^{-5} y 10^{-6} por triplicado para finalmente llevar a incubación durante 24 horas a 37°C (Noh Medina et al., 2014). Adicionalmente, el recuento de las probables *Pseudomonas* y *Bacillus* se hizo por el método de enumeraciones por unidades formadoras de colonia (UFC).

3.9.2. Tinción de Gram

Posteriormente, las cepas seleccionadas fueron sometidas a una tinción Gram para permitir su clasificación preliminar basada en diferencias estructurales y pared celular. Para ello se empleará un cultivo microbiano de las placas Petri, se realizó el extendido de la muestra en el portaobjeto de vidrio con una gota de agua destilada mediante movimiento circular con un asa estéril y se fijó suavemente mediante calor. Se añade a la muestra unas gotas de cristal violeta durante 1 minuto, luego se añade una fuente de yoduro, en este caso se utilizó Lugol tras un tiempo adecuado, normalmente de 30 segundos a 1 minuto. Posteriormente, se añade al portaobjetos una solución de alcohol-acetona durante 30 segundos. Por último, se coloca safranina como colorante contraste. Después de cada uno de estos pasos empezando por la adición de cristal violeta, se realizó un enjuague con agua destilada hasta el último paso donde se agrega safranina para eliminar el exceso de reactivo y evitar interferencias. Finalmente, se procede a la observación de la muestra bajo el microscopio óptico con aceite de inmersión para un mejor enfoque (Popescu & Doyle, 1996).

3.9.3. Caracterización morfológica

La selección se basó en criterios morfológicos como tamaño, forma, borde, coloración, superficie, consistencia y elevación esenciales para la diferenciación preliminar de las cepas.

3.9.4. Caracterización bioquímica

Se realizó una caracterización bioquímica mediante la determinación de la actividad de la enzima catalasa para *Pseudomonas* y *Bacillus*. Además, en algunas bacterias del género *Pseudomonas* la fluorescencia constituye un rasgo fenotípico importante la cual es utilizada como criterio complementario en la identificación de bacterias (Hartney et al., 2013). En base a ello, se efectuó la evaluación en ambos aislamientos.

a. Catalasa

Este ensayo tuvo como objetivo comprobar la presencia de la enzima catalasa en cepas bacterianas para *Pseudomonas* y *Bacillus*. Utilizando un asa de Kolle, se transfirió una cepa del cultivo y se extendió sobre una lámina portaobjeto. Luego, se colocó una gota de peróxido de hidrógeno (H_2O_2) al 3%, y por último, se observó la presencia o ausencia de efervescencia para comprobar la actividad de catalasa (Reiner, 2010).

Soto, (2021) evaluó la prueba de catalasa y la clasificó según la cantidad de efervescencia formada, la cual fue detallada de la siguiente manera: Muy Poco: (-); Medio: (++); Abundante: (+++).

b. Fluorescencia

Para la prueba de fluorescencia, se expusieron los cultivos de cepas microbianas a luz ultravioleta (UV) para observar la presencia del pigmento fluorescente (Perez & Leguizamón, 1998).

3.9.5. Capacidad promotora de crecimiento vegetal

Empleando las colonias obtenidas en la selección primaria, se evaluaron los mecanismos de acción asociados a la promoción de crecimiento vegetal. Se realizaron dos pruebas: la capacidad de solubilización de fosfatos y determinación de la producción de ácido indolacético.

a. Solubilización de fosfato

Para determinar la capacidad de solubilización de fosfato de las cepas aisladas. Se realizó repique inoculando los microorganismos por punción con un asa estéril hacia las placas contenidas con agar Pikovskaya (PVK)

llevando a incubación a 28°C durante 72 horas. Los ensayos se realizaron por cuádruplicado (Alvarado & Gutierrez, 2020). Se observó la solubilización de fosfato, en las zonas de halo formadas alrededor de las colonias, este espacio se midió con un vernier, para luego registrar los datos y calcular el índice de solubilidad de fosfato (ISF) utilizando la siguiente fórmula: (Kumar & Narula, 1999)

$$ISF(\%) = \frac{A+B}{B} \times 100 \quad (1)$$

Donde:

A = Diámetro de solubilización o de la zona del halo (cm)

B = Diámetro de la colonia bacteriana (cm)

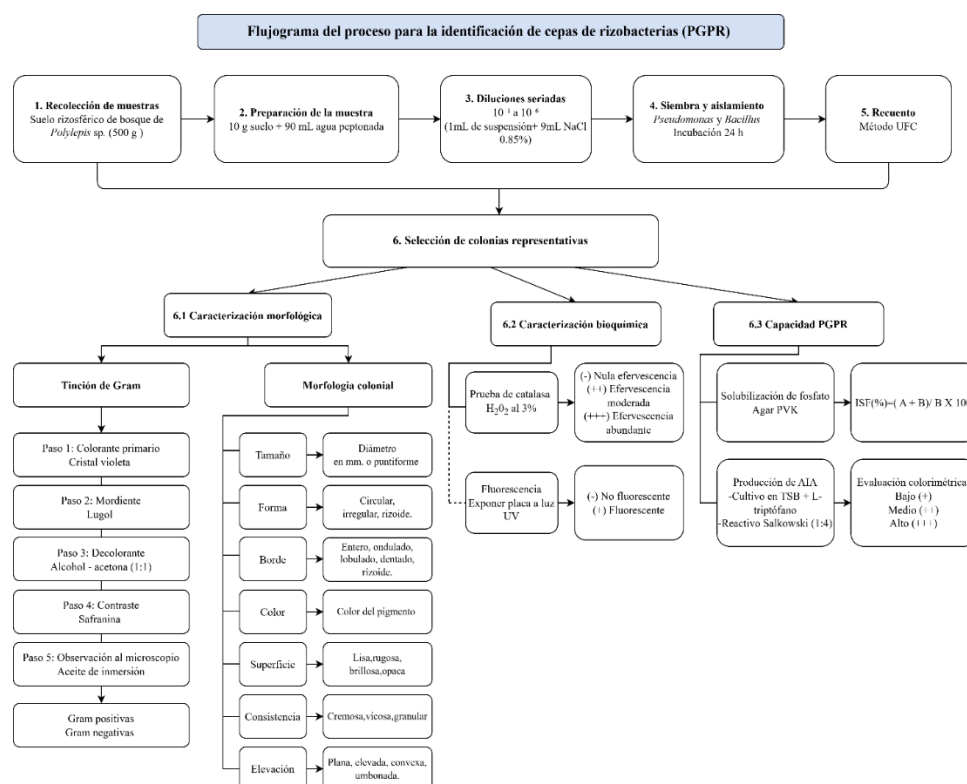
b. Producción de ácido indolacético

Se realizó un ensayo colorimétrico para la determinación de producción de ácido indolacético (AIA) para las cepas de *Pseudomonas* y *Bacillus*, con el fin de confirmar su capacidad como bacterias promotoras de crecimiento vegetal. Estos ensayos se realizaron por triplicado y se empleó un control negativo sin inoculación de bacterias para así garantizar la confiabilidad de los datos. El método empleado para la detección de producción de ácido indolacético (AIA) en la presente investigación se basó en la reacción colorimétrica con el reactivo de Van Urk Salkowski modificado por Bric, Bostock, & Silverstonet, (1991). Cada cepa bacteriana seleccionada de *Pseudomonas* y *Bacillus* se cultivó en 5mL de caldo nutritivo, posterior a ello 1.2 mL de cada cultivo individual fue transferido a 10 mL de medio Tripticasa de soya (TSB) suplementado con L-triptófano a una concentración final de 1 g.L⁻¹ en matraces Erlenmeyer con capacidad de 100 mL. Posteriormente se llevó a la incubadora orbital, donde se incubó por 72 horas a 30°C, en agitación constante a 150 rpm, luego se centrifugó a 3000 rpm, durante 5 minutos para obtener el sobrenadante (León, 2014). Por otro lado, se preparó una solución de FeCl₃ a 0.5 M en un volumen adecuado de disolvente para así obtener la concentración deseada (Anexo II). Tras la preparación de reactivo Salkowski, se transfirió 1 mL del sobrenadante del cultivo en el tubo de vidrio y se añadió 4 ml de reactivo siguiendo la relación 1:4, se agitó la

solución y se dejó en reposo durante 30 minutos en condiciones de oscuridad. Finalmente, se realizó la evaluación colorimétrica donde se observó la reacción. Se consideraron tres niveles cualitativos de producción de AIA: nivel bajo (+), nivel medio (++) y nivel alto (+++) (Huasasquiche et al., 2020).

Figura 3

Flujograma para identificación de bacterias



Fuente: Elaboración propia, 2026.

3.10. Enriquecimiento de sustratos a emplear como tratamientos con las bacterias promotoras de crecimiento

Los sustratos seleccionados para el estudio experimental (humus de lombriz, estiércol de ovino y compost de materia orgánica) se prepararon en proporciones adecuadas para cada tratamiento en bolsas de polietileno con capacidad de 700 g aproximadamente. Posteriormente, para el enriquecimiento de sustratos se prepararon las diluciones en agua destilada para la suspensión bacteriana en relación con el tratamiento por UFC que correspondía. Finalmente, se vertió la cantidad del inóculo aislado, con la finalidad de distribuir las cepas en el sustrato (Marrero et al., 2015).

3.10.1. Preparación de sustratos

Se utilizaron 3 tipos de sustratos para la presente investigación y un control, los sustratos estuvieron compuestos por tres tipos de abonos orgánicos como compost de materia orgánica (CM), estiércol de bovino (EB), humus de lombriz (HL) y solo tierra agrícola (TA). El compost de materia orgánica fue gestionado a través de la Municipalidad Provincial de Juliaca. El humus de lombriz utilizado fue producido a partir de lombriz roja californiana (*Eisenia foetida*). En cuanto al estiércol de bovino, este fue recolectado en un campo de crianza de vacas, seleccionando el material únicamente ya seco, el estiércol de bovino fue previamente pasteurizado en la estufa a una temperatura de 80°C para así evitar el crecimiento de influencia de otras bacterias como coliformes, coliformes fecales, *Escherichia coli* y *Salmonella*, logrando así que este abono también pueda utilizarse en el estudio, finalmente se tamizó para eliminar materiales pedregosos. Estos abonos no se emplearon de forma aislada, fueron previamente mezclados con tierra agrícola y arena en la misma proporción, tomando como guía la metodología descrita por Pacco (2022), de esta manera se obtuvieron cuatro sustratos diferenciados según el tipo de abono empleado. En el siguiente cuadro se detalla la codificación, la composición y proporción de los sustratos que se emplearon.

Tabla 5

Proporción de sustratos

Nº de Sustratos	Código	Composición	Proporción
Sustrato 1	EB	Estiércol de bovino+ arena+ tierra agrícola	2: ½:3
Sustrato 2	HL	Humus de lombriz + arena+ tierra agrícola	2: ½:3
Sustrato 3	CM	Compost de materia orgánica + arena + tierra agrícola	2: ½:3
Control	TA	Tierra Agrícola	

Fuente: Elaboración propia, 2025.

Para la caracterización de sustratos, estos se almacenaron en bolsas herméticas y posteriormente enviados al laboratorio de suelos del Instituto Nacional de Innovación Agraria -INIA con la finalidad de conocer los parámetros fisicoquímicos (Solórzano, 2023).

El análisis se realizó siguiendo métodos estandarizados. El método EPA 9045D se basa en la medición potenciométrica del pH en una suspensión suelo-agua, utilizando un electrodo de vidrio, lo cual permite determinar la acidez o alcalinidad de la muestra (EPA, 2004). Asimismo, la norma ISO 11265:1994 establece la determinación de la conductividad eléctrica mediante la medición en extracto acuoso del suelo, proporcionando un indicador de la concentración de sales solubles y del nivel de salinidad (ISO, 1994). Por otro lado, la NOM-021-RECNAT-2000 comprende procedimientos para la caracterización del suelo, incluyendo la determinación de materia orgánica y macronutrientes, mediante métodos químicos de extracción y cuantificación para la evaluación fertilidad (SEMARNAT, 2002). Por otro lado, el calcio y el magnesio fueron determinados mediante digestión ácida por EPA Method 3050B, seguida de su cuantificación instrumental conforme al EPA Method 7000B, técnicas utilizadas para la determinación de elementos minerales (EPA, 1996, 2007). Finalmente, el nitrógeno total fue determinado mediante el método de combustión completa, técnica basada en la oxidación total de la muestra para cuantificar el contenido de nitrógeno presente. Los parámetros fisicoquímicos evaluados de cada componente se detallan en la siguiente tabla.

Tabla 6

Análisis de parámetros fisicoquímicos de sustratos

Caracteres	Parámetros	Método
Físicos	pH	EPA 9045 D
Químicos	Conductividad eléctrica	ISO 11265:1994
	Materia orgánica	NOM-021-RECNAT-2000
	Nitrógeno total	Combustión complete
	Fósforo disponible	NOM-021-RECNAT-2000
	Calcio	EPA Method 3050B. EPA Method 7000B.
	Magnesio	EPA Method 3050B. EPA Method 7000B.
	Potasio	NOM-021-RECNAT-2000

Fuente: Elaboración propia, 2025.

3.10.2. Llenado de bolsas/Enfundado

Luego de la preparación de sustratos para cada tratamiento, se colocaron las muestras en bolsas de polietileno de 10cm x 20cm, con una capacidad de 700 g por bolsa. El llenado de las bolsas se realizó de forma manual, hasta 5 cm desde la base de cada funda (Rosero, 2014) evitando que quede espacios libres con aire y compactando la tierra.

3.10.3. Riego

Después de estar llenadas las bolsas de repique, se realizó un riego para que el sustrato se encuentre a capacidad de campo listo para la plantación de esquejes (Ramos, 2024). El riego se realizó con regadera, la frecuencia de riego fue de cada dos días para mantener el sustrato húmedo y cuidando de no sobresaturarlo, utilizando 35 L por cada riego (Rosero, 2014).

3.10.4. Selección y recolección de material vegetativo

Para la recolección de esquejes se seleccionaron árboles semilleros o madre de *Polylepis* sp. del bosque andino de la localidad Palca, Lampa, los árboles deben estar sanos, de buen vigor, de edad intermedia, las ramas deben ser semileñosas Hartmann et al., (2011). Para la presente investigación se tomó como referencia lo mencionado por Huarhua (2017), donde se consideraron esquejes con diámetros de 0.6 a 1 cm y una longitud comprendida entre 15 a 25 cm. Seguidamente, se eliminaron hojas inferiores, flores y frutos para evitar la deshidratación del esqueje. Asimismo, con el propósito de facilitar la generación de raíces a partir de las pequeñas protuberancias del esqueje, se realizó el corte en forma de bisel (Rosero, 2014). Una vez acondicionados los esquejes estos deben medir entre 10 a 16 cm de longitud, todo ello con la finalidad de que así se obtenga un tamaño adecuado para la propagación (Huarhua, 2017).

Durante el desarrollo de la presente investigación, el material vegetal fue registrado como *Polylepis* sp., ya que al momento de la ejecución del proyecto no se contaba con la identificación taxonómica, ni bibliografía de la identificación específica en el área de estudio. Por ello adicionalmente se seleccionaron muestras del material vegetal, las cuales fueron sometidas a un

proceso de secado y acondicionamiento para la determinación de especie; y se optó por mantener dicha denominación durante la investigación, evitando asignar la identidad de la especie hasta obtener el sustento taxonómico correspondiente (Véase Anexo IV).

3.10.5. Producción de inóculos bacterianos

Para la preparación de inóculos bacterianos, se utilizaron las cepas seleccionadas en el objetivo anterior, correspondientes al género de *Pseudomonas* y *Bacillus*, las cuales mostraron capacidad para la promoción de crecimiento vegetal. La suspensión bacteriana se ajustó a la concentración de 1×10^4 UFC/ mL, 1×10^6 UFC/ mL y 1×10^8 UFC, correspondiente a las dosis experimentales establecidas (Arcos, 2017). Estas concentraciones se obtuvieron mediante diluciones seriadas y se estableció un volumen estándar de 20 ml por unidad experimental. Estos inóculos producidos en el laboratorio se prepararon en frascos de vidrio ámbar estériles. Posteriormente, se mantuvieron en refrigeración hasta su aplicación para preservar la viabilidad bacteriana (Fiuza et al., 2022).

3.10.6. Inoculación de esquejes con bacterias promotoras de crecimiento vegetal

Los tratamientos se realizaron con una suspensión líquida de 20 mL ajustada a cada una de las dosis aplicadas y direccionada a la base de los esquejes (González et al., 2018) sumergiéndolos en los inóculos bacterianos de *Pseudomonas* y *Bacillus* correspondientes a cada dosis y un tratamiento control donde se aplicó solo agua destilada, por un periodo de tiempo de 10 minutos (Sezen et al., 2014). Los esquejes inoculados se plantaron en el centro de la bolsa, introduciendo hasta $\frac{1}{4}$ aproximadamente de la base, de modo inclinado; asimismo, al final de la plantación, se presionó el sustrato de tal manera que quedara compactado (Rosero, 2014). Posteriormente, sobre los esquejes plantados se asperjó la suspensión bacteriana remanente (Arcos, 2017).

Se utilizaron cuatro 4 tipos de sustratos en total, 3 sustratos con una composición diferente y uno solo con tierra agrícola, la composición y proporción de sustrato se detalla en la Tabla 5. Cada sustrato recibió 7 tratamientos, correspondientes a la inoculación con rizobacterias promotoras

de crecimiento vegetal PGPR de las cepas seleccionadas. A partir de ello, se aplicó tres (3) dosis al género *Pseudomonas*, tres (3) dosis del género *Bacillus*, evaluadas de forma independiente y un tratamiento control (sin inoculación), se realizaron con 8 repeticiones por tratamiento dando como resultado un total de 224 unidades experimentales.

Se dejaron crecer en el vivero con una temperatura media de 16 °C, el fotoperiodo natural aproximado fue de 12 horas de luz y 12 horas de oscuridad hasta obtener los plántones. Finalmente, a los 30, 60 y 90 días se evaluaron las características de crecimiento (Solórzano, 2023)

3.10.7. Deshierbe

El control de maleza se realizó manualmente en tres ocasiones durante la investigación, el primer deshierbe 30 días después de la plantación, luego a los 60 días y finalmente a los 90 días (Rosero, 2014). Además, por el tipo de uno de los sustratos utilizados como fue el estiércol de bovino, se tuvo en cuenta lo mencionado por Mt. Pleasant & Schlather (2017) donde se resalta que el estiércol contiene semillas y de no ser controladas oportunamente provocaría un importante problema de infestación. Por ello, se realizó el deshierbe periódico de las unidades experimentales a fin de evitar competencia de nutrientes y garantizar las condiciones óptimas para el crecimiento de los esquejes.

3.11. Determinación del efecto de los sustratos enriquecidos con cepas de rizobacterias en el enraizamiento y desarrollo de esquejes de *Polylepis* sp.

Como parte del proceso de evaluación del enraizamiento y desarrollo de los esquejes, se realizó la caracterización de las muestras de *Polylepis* sp., con la finalidad de asegurar la identificación correcta del material vegetal empleado en el estudio.

Para evaluar el porcentaje de enraizamiento se aplicó el método del conteo simple, donde se demuestra el porcentaje de plantas vivas con la siguiente fórmula (Huarhua, 2017):

$$\%E = \frac{NPV}{NPT} \times 100 \quad (2)$$

Donde:

%E : Porcentaje de enraizamiento

NPV : Número de plantas vivas

NPT : Número de plantas totales

3.11.1. Parámetros evaluados

Se evaluó el desarrollo mediante los parámetros:

Altura de esquejes. La altura de esquejes se determinó empleando una regla metálica, la evaluación consistió en medir el tallo del eje principal del esqueje desde la base hasta el ápice del tallo a los 90 días después de la inoculación (Huarhua, 2017).

Número de folíolos. Mediante la técnica de conteo simple al cumplir el periodo de 30, 60 y 90 días, se registró la cantidad de hojas en el tallo principal del esqueje (Huarhua, 2017).

Número de brotes. Se aplicó la técnica de conteo simple para registrar los brotes en el tallo principal del esqueje al cumplir el periodo de 30, 60 y 90 días (Huarhua, 2017).

Longitud de raíz. Se evaluó mediante una regla metálica la medida desde el ápice de la raíz más larga hasta el final, esta evaluación se realizó al culminar los 90 días (Huarhua, 2017).

3.12. Análisis Estadístico

Los datos obtenidos fueron analizados utilizando el software IBM SPSS y el software R versión 4.6.1. Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) correspondiente a un Diseño de Bloques Completamente al Azar (DBCA) con arreglo factorial, considerando como factores el tipo de sustrato y los tratamientos con cepas de rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR). Para la comparación de medias entre los niveles de los factores y sus interacciones, se aplicó la prueba de Tukey con un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$.

Tabla 7

Esquema del análisis de varianza para el Diseño en Bloques Completamente al Azar (DBCA) con arreglo factorial

Fuente de variación (FV)	Grados de libertad (gl)	Suma de cuadrados (SC)	Cuadrado medio (CM)	F calculada (F)
Bloques	(r-1)	SCB	CMB	CMB/CME
Sustrato (A)	(a-1)	SCA	CMA	CMA/CME
PGPR (B)	(b-1)	SCBac	CMBac	CMBac/CME
A × B	((a-1)(b-1))	SCAB	CMAB	CMAB/CME
Error experimental	((r-1)(ab-1))	SCE	CME	
Total	(rab-1)	SCT		

Fuente: Adaptado de Yana (2021).

Donde:

a = 4 niveles del factor Sustrato.

b = 7 niveles del factor PGPR.

r = 8 bloques (repeticiones).

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Resultado del aislamiento e identificación de cepas de rizobacterias promotoras de crecimiento vegetal asociadas al bosque andino de *Polylepis* sp.

Se obtuvieron aislamientos bacterianos a partir de muestras rizosféricas de *Polylepis* sp. procedentes de tres árboles, muestreados los cuales fueron identificados como A, B y C. Los recuentos de unidades formadoras de colonias (UFC) mostraron una mayor abundancia del género *Bacillus* respecto a *Pseudomonas* en todos los árboles evaluados (Tabla 8). Los valores oscilaron entre 1×10^8 y 3×10^8 UFC/g para *Bacillus*, mientras que *Pseudomonas* presentó concentraciones entre 2×10^7 y 1.6×10^8 UFC/g.

Tabla 8

Recuento de bacterias aisladas de la rizosfera de Polylepis sp.

Árbol	<i>Pseudomonas</i>	<i>Bacillus</i>	Coordenadas	
			Este	Norte
A	1×10^8	3×10^8	329597	8306426
B	1.6×10^8	1.8×10^8	329805	8306558
C	2×10^7	1.1×10^8	329718	8306421

Fuente: Elaboración propia, 2025.

4.1.1. Caracterización morfológica, caracterización bioquímica y Tinción Gram

A partir del aislamiento primario se seleccionaron cinco colonias representativas, de las cuales dos presentaron características compatibles con el género *Bacillus* (BcA y BcB) y tres con el género *Pseudomonas* (PsA, PsB y PsC). Para facilitar su identificación, se emplearon los códigos Bc para los aislamientos compatibles con *Bacillus* y Ps para los compatibles con *Pseudomonas*, mientras que las letras A, B y C indican el árbol de procedencia de cada aislamiento.

Tabla 9*Caracterización morfológica, caracterización bioquímica y Tinción Gram*

Cepa	Tamaño (mm)	C. Morfológica						C. Bioquímica		Tinción de Gram
		Forma	Borde	Color	Superficie	Consistencia	Elevación	Catalasa	Fluorescencia	
BcA	4.0	Circular	Ondulado	Blanquecina	Opaca	Cremosa	Plana	(++)	(-)	Gram – positivo
BcB	8.0	Irregular	Lobulado	Crema blanquecina	Opaca	Cremosa	Plana	(++)	(-)	Gram – positivo
PsA	5.0	Circular	Entero	Crema amarillenta	Brillosa	Viscosa	Plana	(-)	(+)	Gram – negativo
PsB	7.0	Circular	Entero	Crema amarillenta	Brillosa	Viscosa	Ligeramente convexa	(++)	(+)	Gram – negativo
PsC	2.0	Circular	Entero	Crema	Opaca	Cremosa	Plana	(++)	(+)	Gram – negativo

Fuente: Elaboración propia, 2025.

En la tabla 9 se muestran los resultados de las cepas bacterianas aisladas que presentaron características morfológicas y bioquímicas compatibles con los géneros *Bacillus* y *Pseudomonas*. Las cepas presuntivas de *Bacillus* (BcA y BcB) desarrollaron colonias de color blanquecino a crema blanquecina, superficie opaca, consistencia cremosa y bordes ondulados o lobulados. En contraste, las cepas compatibles con *Pseudomonas* (PsA, PsB y PsC) formaron colonias de color crema amarillento, circulares, superficie brillante y consistencia viscosa características típicas de este género (Figura 17).

En la caracterización bioquímica, la prueba de catalasa mostró una reacción positiva en las cinco cepas evaluadas (Véase Figura 15), evidenciada por la formación inmediata de efervescencia, la intensidad de la reacción correspondió principalmente a un nivel medio (++) en ambos géneros. Asimismo, las cepas de *Pseudomonas* presentaron fluorescencia positiva bajo luz ultravioleta, mientras que las cepas de *Bacillus* no mostraron fluorescencia, constituyendo un criterio complementario para la diferenciación entre ambos géneros. Finalmente, la tinción de Gram permitió corroborar la clasificación preliminar de las cepas aisladas. Las cepas presuntivas de *Pseudomonas* se observaron como bacilos cortos Gram negativos, teñidos de color rosado-rojizo, distribuidos principalmente de forma aislada y en pequeños agregados, con una morfología uniforme. En contraste, las cepas compatibles con el género *Bacillus* presentaron bacilos Gram positivos de color morado intenso, observándose de forma aislada y formando cadenas cortas, características compatibles con este género bacteriano como se muestra en la Figura 14.

Estos resultados concuerdan con los reportados por Llanco (2015), quien aisló cepas de *Bacillus* y *Pseudomonas* provenientes de la rizósfera de diferentes variedades de quinua y realizó su caracterización morfológica, bioquímica y fisiológica como etapa previa a la evaluación de sus atributos PGPR. Del mismo modo Madigan et al. (2021) señalan que la morfología colonial constituye uno de los primeros criterios utilizados para la identificación presuntiva de ambos géneros bacterianos. Respecto a la caracterización bioquímica, la reacción positiva de catalasa observada en la mayoría de las cepas coincide con lo reportado por Huasasquiche et al. (2020), quienes emplearon esta prueba durante la caracterización de bacterias asociadas al

cultivo de tarwi, identificando cepas compatibles con *Bacillus* y *Pseudomonas*. Además, en la prueba de fluorescencia, únicamente las cepas de *Pseudomonas* presentaron fluorescencia positiva bajo luz UV, estos resultados son consistentes con lo descrito por Botelho y Mendonça (2006), quienes señalan que la producción de pigmentos fluorescentes constituye una característica fenotípica distintiva de numerosas especies de *Pseudomonas* asociadas a la rizósfera y es empleada como criterio complementario para su identificación presuntiva. Finalmente, la tinción de Gram corroboró la clasificación preliminar de las cepas aisladas. Resultados similares fueron reportados por Velarde et al. (2021), quienes identificaron aislamientos compatibles con bacilos Gram positivos y Gram negativos mediante la caracterización fenotípica, confirmando posteriormente su identidad como *Bacillus pumilus* y *Pseudomonas fluorescens* mediante secuenciación del gen ARNr 16S. Evidenciando que la evaluación macroscópica, microscópica y bioquímica continúa siendo una herramienta confiable para la identificación presuntiva y selección inicial de rizobacterias con potencial promotor del crecimiento vegetal.

4.1.2. Capacidad promotora de crecimiento vegetal

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en la evaluación de la capacidad de solubilización de fosfatos (ISF) y la producción de ácido indolacético (AIA) en las cepas bacterianas analizadas donde cada aislamiento fue evaluado en cuatro repeticiones, identificadas con los números del 1 al 4.

Tabla 10*Índice de solubilización de fosfato (ISF) y AIA cualitativo para Bacillus y Pseudomonas*

Cepa	B	A+B	ISF (%)	AIA cualitativo
BcB1	1.1	1.8	163.64	
BcB2	1	1.6	160	(++)
BcB3	1.2	1.9	158.33	
BcB4	1.1	1.9	172.73	
BcA1	1.5	2	133.33	
BcA2	1.2	1.8	150	(+++)
BcA3	1.5	2.2	146.67	
BcA4	1	1.9	190	
PsC1	0.85	1.1	129.41	
PsC2	0.7	1	142.86	(+))
PsC3	0.7	1.1	157.14	
PsC4	0.6	0.9	150	
PsB1	0.7	1	142.86	
PsB2	0.8	1.1	137.5	(++)
PsB3	0.8	1.3	162.5	
PsB4	0.8	1.2	150	
PsA1	0.9	1.2	133.33	
PsA2	1.1	1.3	118.18	(++)
PsA3	1.6	2.1	131.25	
PsA4	1.1	1.5	136.36	
C1	0.7	0.7	100	(-)
C2	0.8	0.8	100	
C3	0.8	0.8	100	
C4	0.6	0.6	100	

Nota. A = Diámetro de la colonia bacteriana; A+B = Diámetro total de la colonia más el halo; ISF = Índice de Solubilización de Fosfato; C = control.

Fuente: Elaboración propia, 2025.

En la tabla 10 los resultados obtenidos evidenciaron que todas las cepas evaluadas presentaron capacidad para solubilizar fosfatos en medio Pikovskaya, manifestada por la formación de halos transparentes alrededor de las colonias bacterianas, a diferencia del tratamiento control (C1–C4), que no mostró evidencia de solubilización. Las cepas del género *Bacillus* registraron índices de solubilización de fosfato (ISF) entre 133.33% y 190%, mientras que las cepas de *Pseudomonas* presentaron valores entre 118.18 % y 162.50 %, observándose una mayor eficiencia de solubilización en las cepas de *Bacillus*. Estos resultados evidencian que ambos géneros poseen la capacidad de movilizar fósforo insoluble, atributo reconocido como uno de los principales mecanismos de promoción del crecimiento vegetal (Ver Figura 18).

En cuanto a la producción de ácido indolacético, la prueba colorimétrica con el reactivo de Salkowski mostró resultados positivos en ambos géneros, evidenciados por la aparición de tonalidades rosadas. La cepa BcA presentó la mayor intensidad de coloración correspondiente a una producción alta de AIA (+++), seguida por la cepa BcB con una producción moderada (++). En el género *Pseudomonas*, la cepa PsA evidenció una producción moderada (++), mientras que la cepa PsC presentó una producción baja (+) y la cepa control (C) no mostró cambios indicando ausencia de producción de AIA (-).

Los resultados obtenidos son comparables con los reportados por Solórzano (2023), quien evaluó cepas de *Bacillus* y *Pseudomonas* asociadas a la rizósfera de *Persea americana*, encontrando que 12 de 26 aislamientos presentaron capacidad solubilizadora de fosfatos entre 100 % y 300 %, destacando cepas del género *Bacillus*. Este resultado coincide en que las cepas pertenecientes a estos géneros presentan un importante potencial para movilizar fósforo insoluble. Asimismo, Ruiz et al. (2021) evaluaron aislados nativos de *Pseudomonas fluorescens* y clasificaron como las más eficientes aquellas cepas con un ISF superior a 1.75. En ese contexto, el mayor valor obtenido en la presente investigación (190 %, equivalente a un ISF de 1.90) supera dicho umbral, evidenciando una buena capacidad de solubilización de fosfatos en las cepas nativas aisladas de la rizósfera de *Polylepis* sp. Las diferencias observadas entre los valores reportados en estos estudios y los obtenidos en la presente investigación podrían atribuirse al tiempo de incubación.

En el caso de la evaluación de producción de AIA los resultados obtenidos guardan similitud con los reportados por Huasasquiche et al. (2020), quienes evaluaron bacterias asociadas al cultivo de tarwi y mediante una prueba cualitativa clasificaron a *Bacillus cereus* con una reacción alta (+++) y a *Bacillus circulans* con una reacción moderada (++) evidenciando variaciones en la intensidad entre cepas del mismo género. Asimismo, Llanco (2015) evaluó cepas de *Pseudomonas* y *Bacillus*, observando diferencias en la intensidad de la coloración. En *Pseudomonas*, la cepa PS13 presentó una coloración púrpura, mientras que las cepas PS15 y PS4 mostraron tonalidades más tenues. En *Bacillus*, la cepa BA14 evidenció una coloración rojo intenso, asociada a una mayor producción de AIA. Este comportamiento coincide con los resultados obtenidos en la presente investigación, donde las cepas del género *Bacillus* desarrollaron una coloración más intensa que las cepas de *Pseudomonas*, lo que sugiere una mayor actividad en la producción de compuestos indólicos (Ver Figura 19). Además, concuerda con lo señalado por Velasco et al. (2020) quienes indican que la producción de AIA constituye uno de los principales mecanismos de promoción del crecimiento vegetal.

Finalmente, en base a los resultados obtenidos, se seleccionaron las cepas BcA y PsB por presentar las mejores características asociadas a bacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR). BcA destacó por la mayor intensidad en la producción cualitativa de AIA, mientras que PsB presentó una respuesta favorable tanto en la producción de AIA como en la solubilización de fosfatos. En adelante la cepa BcA fue considerada como *Bacillus* sp. y la cepa PsB como *Pseudomonas* sp.

4.2. Resultados del enriquecimiento de los sustratos con rizobacterias promotoras de crecimiento vegetal aisladas e identificadas

Las cepas seleccionadas de *Pseudomonas* sp. y *Bacillus* sp., previamente caracterizadas por sus propiedades promotoras del crecimiento vegetal, fueron utilizadas para el enriquecimiento de los sustratos experimentales. Para ello se prepararon suspensiones bacterianas con concentraciones de 1×10^4 , 1×10^6 y 1×10^8 UFC/mL, las cuales fueron aplicadas a razón de 20 mL por unidad experimental.

Obteniéndose los tratamientos establecidos para la evaluación de la propagación vegetativa de esquejes de *Polylepis* sp. Asimismo como parte del proceso de enriquecimiento, se determinaron las características fisicoquímicas de los sustratos utilizados en el ensayo, con el propósito de conocer las condiciones iniciales del medio donde fueron inoculadas las cepas de *Pseudomonas* sp. y *Bacillus* sp. Los resultados obtenidos se presentan en siguiente tabla.

Tabla 11

Parámetros fisicoquímicos de los sustratos utilizados

Parámetro	Unidad	Sustrato 0 (TA)	Sustrato 1 (HL)	Sustrato 3 (CM)	Sustrato 4 (EB)
pH		7.1	6.9	7	7.2
Conductividad eléctrica	mS/m	9.1	14.6	9.6	24.3
Materia orgánica	%	4.3	5.3	5.3	5.3
Fósforo	mg/kg	917.1	949	661.9	767.8
Potasio	mg/kg	1450	1550	1460	1640
Calcio	mg/kg	11700	9200	10100	12700
Magnesio	mg/kg	4900	4800	5100	5200
Nitrógeno	mg/kg	3500	6640	6450	8660

Fuente: Elaboración propia, 2025.

Según la Tabla 11, el análisis químico evidenció diferencias en los sustratos empleados en el enriquecimiento con las cepas PGPR, cuya composición y proporciones se describen previamente en la tabla 5. HL presentó el mayor contenido de fósforo (949.0 mg/kg), mientras que EB registró las mayores concentraciones de nitrógeno (8660.0 mg/kg) y conductividad eléctrica (24.3 mS/m). Por su parte, TA presentó 917.1 mg/kg de fósforo y 11700 mg/kg de calcio, mientras que CM mostró valores intermedios para la mayoría de los nutrientes evaluados y un pH cercano a la neutralidad.

El pH de los sustratos osciló entre 6.9 y 7.2, correspondiente a una reacción cercana a la neutralidad. Estos valores fueron similares a los reportados por Zapalowska et al. (2023) en mezclas de compost y turba (6.63-7.05). Mientras Richardson et al. (2009)

señalan que valores próximos a la neutralidad favorecen la actividad microbiana y los procesos de movilización de nutrientes esenciales. Asimismo, Román (2024) indica que durante la etapa juvenil *Polylepis* sp. se desarrolla en suelos con pH comprendido entre 5.38 y 8.27.

Respecto a la conductividad eléctrica, los sustratos registraron valores entre 9.1 y 24.3 mS/m (0.09–0.24 dS/m), inferiores al rango reportado por Zapalowska et al. (2023) para mezclas de compost y turba (13.6–195.8 mS/m) y a los aproximadamente 2.0 dS/m (200 mS/m) registrados por Guadalupe (2026) en suelos bajo cobertura de *Polylepis* sp. Esta condición resulta favorable, ya que la baja concentración de sales reduce el riesgo de estrés osmótico y favorece tanto el establecimiento radicular como la actividad de las bacterias promotoras del crecimiento vegetal (Brady & Weil, 2017).

La materia orgánica presentó valores entre 4.3 y 5.3 %, superiores a los reportados para suelos naturales de bosques de *Polylepis*. Romani (2020) registró contenidos entre 1.66 y 3.20 %, mientras que Ccallo (2024) encontró valores cercanos a 3.8 % y Guadalupe (2026) reportó contenidos de 3.94%. La mayor concentración de materia orgánica se explicaría por la incorporación de humus, compost y estiércol bovino durante la formulación de los sustratos. En ese sentido, Velasco et al. (2020) señalan que la materia orgánica es una importante fuente de carbono y energía que favorece la supervivencia y actividad metabólica de las PGPR después de su inoculación.

El contenido de fósforo (661.9-949.0 mg/kg), potasio (1450-1640 mg/kg), calcio (9200-12700 mg/kg) y magnesio (4800-5200 mg/kg) se encontró dentro de los rangos reportados por Zapalowska et al. (2023) para mezclas de sustratos elaboradas con compost y turba, quienes registraron 205-4255 mg/kg de fósforo, 274-4744 mg/kg de potasio, 2130-18080 mg/kg de calcio, 1370-4170 mg/kg de magnesio y nitrógeno (3500-8660 mg/kg). Aunque el contenido de magnesio obtenido en el presente estudio fue ligeramente superior y el de nitrógeno inferior a los rangos reportados. Estas diferencias pueden atribuirse a la composición de los sustratos, ya que las mezclas utilizadas estuvieron constituidas por materiales orgánicos combinados con tierra agrícola y arena cuya proporción modifica la disponibilidad de nutrientes. Los resultados evidencian una adecuada disponibilidad de nutrientes para favorecer el establecimiento inicial de los esquejes y el desarrollo de la microbiota inoculada.

De manera complementaria, se evaluó la calidad del agua empleada durante el riego de los esquejes en el ensayo experimental. Los resultados completos se presentan en el Anexo V. El análisis indicó un pH de 8.7, una conductividad eléctrica de 302 $\mu\text{S}/\text{cm}$, un valor de R.A.S. de 1.66, 189 mg/L de sólidos totales disueltos y una clasificación C2S1, correspondiente a un agua de buena calidad apta para riego. Estas características indican que el agua utilizada no representó una limitante para el establecimiento de las cepas inoculadas ni para el desarrollo inicial de los esquejes, permitiendo que las respuestas observadas durante el experimento estuvieran asociadas principalmente a los tratamientos evaluados.

4.3. Resultados del efecto de los sustratos enriquecidos con cepas de rizobacterias en el enraizamiento y desarrollo de esquejes de *Polylepis* sp.

La caracterización taxonómica de las muestras de *Polylepis* sp. recolectadas del bosque de Antalla, distrito de Palca, provincia de Lampa, región Puno, correspondieron a *Polylepis triacontandra* (Véase Anexo IV), especie anteriormente catalogada como *Polylepis racemosa* Ruiz & Pav. subsp. *triacontandra* (Bitter). De acuerdo con Boza y Kessler (2022), esta especie ha sido registrada en el sur del Perú, con reportes principalmente en la provincia de Sandia, lo que evidencia una distribución restringida. No obstante, la información disponible para la provincia de Lampa evidencia que la composición específica del género *Polylepis* no sería uniforme. En ese sentido, Montesinos et al. (2015) estudiaron la vegetación de un bosque de *Polylepis incarum* registrando la presencia de esta especie en otra zona denominada Lamparaquén de la misma provincia. Asimismo, para la zona de Palca se ha reportado la presencia de *Polylepis pallidistigma* (Mulluni, 2023). En conjunto, estos antecedentes y los resultados obtenidos sugieren una marcada variabilidad taxonómica de los bosques de *Polylepis* en la provincia de Lampa, evidenciando la posible presencia de diferentes especies del género distribuidas en distintos sectores de esta provincia.

Con la identificación taxonómica del material vegetal como respaldo de estudio, se procedió a la evaluación de las variables correspondientes al tercer objetivo. Se analizaron cinco indicadores fisiológicos relacionados al porcentaje de enraizamiento, altura, longitud de raíz, número de brotes y número de foliolos.

La comparación entre tratamientos permitió identificar qué combinaciones de sustrato y concentración bacteriana favorecieron significativamente el desarrollo vegetativo de los esquejes.

Para contrastar la tercera hipótesis específica de la investigación, se realizó el análisis estadístico inferencial, para lo cual se formularon las siguientes hipótesis estadísticas:

- H_0 : Los sustratos enriquecidos con cepas de rizobacterias no influyen significativamente en el enraizamiento y desarrollo vegetativo de esquejes de *Polylepis* sp.
- H_1 : Los sustratos enriquecidos con cepas de rizobacterias influyen significativamente en el enraizamiento y desarrollo vegetativo de esquejes de *Polylepis* sp.

4.3.1. Porcentaje de enraizamiento

El enraizamiento de los esquejes de *Polylepis* sp. fue evaluado a los 90 días mediante una variable dicotómica, donde el valor 1 representó a los esquejes que formaron raíces y el valor 0 a aquellos que no enraizaron. Para facilitar la interpretación, las medias obtenidas por tratamiento se expresaron como porcentaje de enraizamiento. Se realizó un análisis de varianza para determinar el efecto de las PGPR, los sustratos y su interacción, cuyos resultados se presentan en la Tabla 12.

Tabla 12

*Análisis de varianza para el porcentaje de enraizamiento de los esquejes de *Polylepis* sp.*

Fuente de variación	SC	gl	CM	F	p
Bloque	2.286	7	0.327	1.388	0.212
Sustrato	1.929	3	0.643	2.733	0.045
PGPR	2.116	6	0.353	1.499	0.180
Sustrato $\times$ PGPR	0.634	18	0.035	0.150	1.000
Error	44.464	189	0.235		
Total corregido	51.429	223			

Fuente: Elaboración propia, 2025.

El análisis de varianza mostró que el sustrato presentó un efecto significativo sobre el enraizamiento de los esquejes de *Polylepis* sp. ($p = 0.045$). En contraste, las PGPR no mostraron un efecto significativo ($p = 0.180$), al igual que la interacción sustrato $\times$ PGPR ($p = 1.000$) y el efecto del bloque ($p = 0.212$). Estos resultados indican que las diferencias observadas en el enraizamiento estuvieron asociadas principalmente al tipo de sustrato empleado, sin evidenciarse un efecto significativo de las PGPR ni de su interacción con el sustrato.

Además con la finalidad de identificar las diferencias entre las medias de los niveles de los factores evaluados, se realizó la prueba de comparación múltiple de Tukey ($\alpha = 0.05$), cuyos resultados se presentan en la tabla a continuación.

Tabla 13

Prueba de Tukey para el porcentaje de enraizamiento según PGPR y sustrato

Factor	Nivel	Enraizamiento (%)	Grupo
PGPR	<i>Bacillus</i> sp. 1×10^8 UFC/mL	47	a
	<i>Bacillus</i> sp. 1×10^6 UFC/mL	44	a
	<i>Pseudomonas</i> sp. 1×10^8 UFC/mL	44	a
	<i>Pseudomonas</i> sp. 1×10^6 UFC/mL	37	a
	<i>Bacillus</i> sp. 1×10^4 UFC/mL	34	a
	Control	25	a
	<i>Pseudomonas</i> sp. 1×10^4 UFC/mL	19	a
Sustrato	CM	48	a
	EB	41	a
	HL	27	a
	TA	27	a

Fuente: Elaboración propia, 2025.

La mayor media del factor PGPR correspondió a *Bacillus* sp. a 1×10^8 UFC/mL, con 47 % de enraizamiento, mientras que *Pseudomonas* sp. a 1×10^4 UFC/mL presentó la menor media, con 19 %. Sin embargo, todos los niveles conformaron un único grupo homogéneo, confirmando la ausencia de diferencias significativas entre las PGPR.

Respecto a los sustratos, CM (2 compost de materia orgánica + ½arena + 3tierra agrícola) presentó la mayor media, con 48 % de enraizamiento, seguido del EB (2 estiércol de bovino + ½arena + 3tierra agrícola) con 41 %. HL (2 humus de lombriz + ½arena + 3tierra agrícola) y TA (tierra agrícola) registraron las menores medias con 27 %. Aunque el ANOVA detectó un efecto global del sustrato, la prueba de Tukey no identificó diferencias significativas entre pares específicos, debido a que todos conformaron un único grupo homogéneo.

Asimismo, se realizó la prueba de Tukey para comparar las medias de las combinaciones PGPR × sustrato en el porcentaje de enraizamiento a los 90 días. Los resultados se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 14

Comparación de medias de los tratamientos para el porcentaje de enraizamiento mediante la prueba de Tukey.

Tratamiento	Sustrato	PGPR	Enraizamiento (%)	Grupo
T20	CM	<i>Bacillus</i> sp. 1×10^8	62.5	a
T10	EB	<i>Pseudomonas</i> sp. 1×10^8	50.0	a
T12	EB	<i>Bacillus</i> sp. 1×10^6	50.0	a
T13	EB	<i>Bacillus</i> sp. 1×10^8	50.0	a
T16	CM	<i>Pseudomonas</i> sp. 1×10^6	50.0	a
T17	CM	<i>Pseudomonas</i> sp. 1×10^8	50.0	a
T18	CM	<i>Bacillus</i> sp. 1×10^4	50.0	a
T19	CM	<i>Bacillus</i> sp. 1×10^6	50.0	a
T26	TA	<i>Bacillus</i> sp. 1×10^6	50.0	a
T11	EB	<i>Bacillus</i> sp. 1×10^4	37.5	a
T14	EB	Control	37.5	a
T15	CM	<i>Pseudomonas</i> sp. 1×10^4	37.5	a
T2	HL	<i>Pseudomonas</i> sp. 1×10^6	37.5	a
T21	CM	Control	37.5	a
T24	TA	<i>Pseudomonas</i> sp. 1×10^8	37.5	a
T27	TA	<i>Bacillus</i> sp. 1×10^8	37.5	a

Tratamiento	Sustrato	PGPR	Enraizamiento (%)	Grupo
T3	HL	<i>Pseudomonas</i> sp. 1×10^8	37.5	a
T6	HL	<i>Bacillus</i> sp. 1×10^8	37.5	a
T9	EB	<i>Pseudomonas</i> sp. 1×10^6	37.5	a
T23	TA	<i>Pseudomonas</i> sp. 1×10^6	25.0	a
T25	TA	<i>Bacillus</i> sp. 1×10^4	25.0	a
T4	HL	<i>Bacillus</i> sp. 1×10^4	25.0	a
T5	HL	<i>Bacillus</i> sp. 1×10^6	25.0	a
T8	EB	<i>Pseudomonas</i> sp. 1×10^4	25.0	a
T1	HL	<i>Pseudomonas</i> sp. 1×10^4	12.5	a
T28	TA	Control	12.5	a
T7	HL	Control	12.5	a
T22	TA	<i>Pseudomonas</i> sp. 1×10^4	0.0	a

Fuente: Elaboración propia, 2025.

Aunque la interacción PGPR×sustrato no fue significativa, la comparación de las combinaciones se presenta con fines descriptivos, permitiendo identificar las tendencias observadas entre los tratamientos evaluados. El tratamiento T20, correspondiente a CM con *Bacillus* sp. a 1×10^8 UFC/mL, presentó el mayor porcentaje de enraizamiento, con 62.5 %. En segundo lugar se ubicaron T10, T12, T13, T16, T17, T18, T19 y T26, todos con 50 %. Los menores porcentajes correspondieron a T1, T7 y T28, con 12.5 %, mientras que T22 no presentó enraizamiento.

El mejor comportamiento del sustrato CM (2 compost de materia orgánica + ½arena + 3tierra agrícola) podría relacionarse con la combinación de sus características físicas y químicas. Además, su estructura más estable pudo favorecer una adecuada retención de humedad y aireación del medio. Según Hartmann et al. (2011), el éxito del enraizamiento depende de un equilibrio entre las condiciones físicas del sustrato y la disponibilidad de nutrientes más que un solo factor.

El porcentaje obtenido en la presente investigación fue menor al reportado por Pacco (2022), quien obtuvo 65 % de prendimiento en esquejes de *Polylepis tomentella* con estiércol de ovino + arena + tierra agrícola, y 58 % con humus + estiércol de ovino + arena + tierra agrícola. Asimismo, Yana (2021) quien alcanzó 76.19 % de establecimiento en esquejes de *Polylepis tomentella* con AIB Rapid Root. Esta diferencia puede explicarse porque el AIB es una fitohormona sintética de acción directa sobre la rizogénesis, mientras que las PGPR actúan mediante mecanismos biológicos dependientes de la colonización bacteriana. Además, factores como la procedencia de los esquejes, las características del material vegetal empleado y las condiciones ambientales durante la fase de vivero pueden haber influido en la variación de los porcentajes de enraizamiento entre estudios. Por ello, aunque el compost enriquecido con rizobacterias no superó los valores obtenidos con enraizadores hormonales, sí representa una alternativa biológica con potencial para reducir la dependencia de productos químicos en la propagación vegetativa de especies altoandinas.

Los tratamientos T19 y T20, correspondientes a CM inoculado con *Bacillus* sp. a 1×10^6 y 1×10^8 UFC/mL, alcanzaron los mayores porcentajes de enraizamiento (62.5 %). Aunque estas diferencias no fueron significativas entre los 28 tratamientos, la tendencia observada sugiere que la combinación entre compost y *Bacillus* sp. pudo favorecer la emisión de raíces adventicias. Este comportamiento es coherente con investigaciones en especies leñosas donde las PGPR han sido evaluadas como inductoras del enraizamiento.

Gordillo et al. (2025) evaluaron cepas nativas de PGPR en estacas de *Vitis* spp. y reportaron que *Pseudomonas* promovió el enraizamiento adventicio en estacas de Malbec, alcanzando porcentajes de 80 %. Además, los mejores resultados obtenidos estarían relacionados con la concentración del inóculo bacteriano. En este sentido, Arcos (2017) determinó que concentraciones de 1×10^8 y 1×10^6 UFC/mL fueron las más eficientes para promover el crecimiento y rendimiento del cultivo de papa, lo que evidencia que la dosis de las PGPR es un factor determinante en la respuesta de las plantas. En el presente estudio, los tratamientos inoculados con *Bacillus* sp. a 1×10^6 y 1×10^8 UFC/mL

presentaron los mayores porcentajes de enraizamiento, lo que sugiere que estas concentraciones favorecieron el establecimiento de los esquejes de *Polylepis* sp. bajo las condiciones evaluadas.

4.3.2. Longitud de raíz

La longitud de raíz fue evaluada con el propósito de determinar el efecto de los sustratos enriquecidos con cepas de rizobacterias sobre el desarrollo radicular de los esquejes de *Polylepis* sp. Los resultados del análisis de varianza y de las comparaciones múltiples mediante la prueba de Tukey se presentan a continuación.

Tabla 15

Análisis de varianza para la longitud de raíz de los esquejes de Polylepis sp.

Fuente de variación	gl	SC	CM	F	p
Bloque	7	5.123	0.732	0.100	0.998
Sustrato	3	171.433	57.144	7.806	<0.001
PGPR	6	602.745	100.458	13.722	<0.001
Sustrato × PGPR	17	94.620	5.566	0.760	0.726
Error	45	329.434	7.321		
Total corregido	78	1304.944			

Fuente: Elaboración propia, 2025.

En la Tabla 15 se muestra el análisis de varianza donde se muestra que el sustrato y las rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR) ejercieron un efecto significativo sobre la longitud de raíz de los esquejes de *Polylepis* sp. ($p < 0.001$). En contraste, el bloque ($p = 0.998$) y la interacción entre sustrato y PGPR ($p = 0.726$) no presentaron efectos estadísticamente significativos. Estos resultados indican que la respuesta en la longitud de raíz dependió del efecto individual de cada factor, mientras que la combinación entre el tipo de sustrato y la inoculación con PGPR no modificó significativamente esta variable. Dado que se encontraron diferencias significativas para los factores sustrato y PGPR, se realizó la prueba de comparación de medias de Tukey. En la Tabla 16 se presentan los resultados obtenidos para la longitud de raíz según cada factor.

Tabla 16*Prueba de Tukey para la longitud de raíz según PGPR y sustrato*

Factor	Tratamiento	Longitud de raíz (cm)	Grupo
Sustrato	TA	14.09	b
	HL	14.59	b
	EB	15.98	ab
	CM	17.16	a
PGPR	Control	11.38	c
	<i>Pseudomonas</i> sp. 1×10^4 UFC/mL	11.78	c
	<i>Bacillus</i> sp. 1×10^4 UFC/mL	14.03	bc
	<i>Pseudomonas</i> sp. 1×10^6 UFC/mL	14.75	bc
	<i>Bacillus</i> sp. 1×10^6 UFC/mL	15.81	b
	<i>Pseudomonas</i> sp. 1×10^8 UFC/mL	16.87	b
	<i>Bacillus</i> sp. 1×10^8 UFC/mL	20.70	a

Fuente: Elaboración propia, 2025.

En la tabla 16 la prueba de Tukey mostró diferencias significativas entre los niveles de los factores evaluados. En el caso del sustrato, CM (2 compost de materia orgánica + ½arena + 3tierra agrícola) presentó la mayor longitud promedio de raíz (17.16 cm), seguido por EB (2 estiércol de bovino + ½arena + 3tierra agrícola) con 15.98 cm, mientras que el HL (2 humus de lombriz + ½arena + 3tierra agrícola) y la tierra agrícola (TA) registraron los menores valores. Respecto a las PGPR, *Bacillus* 1×10^8 alcanzó la mayor longitud promedio de raíz (20.70 cm), seguido por *Pseudomonas* 1×10^8 (16.87 cm) y *Bacillus* 1×10^6 (15.81 cm). En contraste, el control (11.38 cm) y *Pseudomonas* 1×10^4 (11.78 cm) presentaron las menores longitudes de raíz, lo que evidencia que las mayores concentraciones bacterianas favorecieron el desarrollo radicular de los esquejes.

Tabla 17

Comparación de medias de los tratamientos para la longitud de raíz mediante la prueba de Tukey.

Trata miento	Sustrato	PGPR	Longitud de raíz (cm)	Grupo
T20	CM	<i>Bacillus</i> 1×10^8	23.40	a
T13	EB	<i>Bacillus</i> 1×10^8	21.78	ab
T6	HL	<i>Bacillus</i> 1×10^8	19.47	abc
T17	CM	<i>Pseudomonas</i> 1×10^8	19.43	abc
T10	EB	<i>Pseudomonas</i> 1×10^8	18.13	abc
T19	CM	<i>Bacillus</i> 1×10^6	16.55	abc
T5	HL	<i>Bacillus</i> 1×10^6	16.50	abc
T16	CM	<i>Pseudomonas</i> 1×10^6	16.05	bc
T26	TA	<i>Bacillus</i> 1×10^6	16.00	bc
T27	TA	<i>Bacillus</i> 1×10^8	16.00	bc
T18	CM	<i>Bacillus</i> 1×10^4	15.68	bc
T9	EB	<i>Pseudomonas</i> 1×10^6	15.37	bc
T3	HL	<i>Pseudomonas</i> 1×10^8	14.83	bc
T12	EB	<i>Bacillus</i> 1×10^6	14.53	bc
T11	EB	<i>Bacillus</i> 1×10^4	14.30	bc
T24	TA	<i>Pseudomonas</i> 1×10^8	13.83	bc
T15	CM	<i>Pseudomonas</i> 1×10^4	13.53	c
T14	EB	Control	13.37	c
T23	TA	<i>Pseudomonas</i> 1×10^6	13.25	c
T2	HL	<i>Pseudomonas</i> 1×10^6	12.75	c
T4	HL	<i>Bacillus</i> 1×10^4	12.30	c
T25	TA	<i>Bacillus</i> 1×10^4	12.05	c
T21	CM	Control	11.60	c
T8	EB	<i>Pseudomonas</i> 1×10^4	10.35	c
T1	HL	<i>Pseudomonas</i> 1×10^4	9.40	c
T7	HL	Control	8.90	c
T28	TA	Control	7.20	c

Fuente: Elaboración propia, 2025.

En la tabla 17 se muestran los tratamientos individuales. Se observó que la interacción del tratamiento T20 presentó la mayor longitud promedio de raíz (23.40 cm), seguido por T13 con 21.78 cm. Asimismo, los tratamientos T6, T17 y T10 también registraron los mayores valores de longitud de raíz. En contraste, los menores promedios correspondieron a T28 con 7.20 cm y T7 con 8.90 cm. Asimismo, el tratamiento T22 no presentó enraizamiento, por lo que no fue incluido en el análisis de la longitud de raíz.

La longitud de raíz constituyó una de las variables que respondió significativamente tanto al tipo de sustrato como a la inoculación con PGPR. La mayor longitud promedio de raíz se obtuvo con el tratamiento T20 (CM + *Bacillus* sp. 1×10^8 UFC/mL) el cual registró el mayor valor absoluto (23.40 cm). Aunque esta combinación presentó el mejor desempeño, la ausencia de interacción significativa entre ambos factores indica que el incremento observado respondió al efecto individual del sustrato y de la cepa bacteriana sobre el desarrollo radicular de los esquejes.

Desde el punto de vista fisiológico, la formación y elongación de raíces adventicias constituyen una etapa importante durante la propagación vegetativa, ya que permiten al esqueje restablecer la absorción de agua y nutrientes tras su separación de la planta madre (Hartmann et al., 2011). En este contexto, el mayor desempeño de *Bacillus* sp. a 1×10^8 UFC/mL está relacionado con la mayor eficiencia de esta concentración, comportamiento que coincide con lo reportado por Arcos (2017), quien encontró que las concentraciones de 1×10^8 y 1×10^6 UFC/mL promovieron un mayor crecimiento en comparación con 1×10^4 UFC/mL. Asimismo, este resultado guarda concordancia con los hallazgos obtenidos en los objetivos anteriores de la presente investigación, donde la cepa de *Bacillus* presentó la mayor producción de ácido indolacético y una elevada capacidad de solubilización de fosfatos. Este resultado puede explicarse porque la producción de esta fitohormona favorece la formación y elongación de raíces adventicias (Patten y Glick, 2002), mientras que el sustrato CM proporcionó condiciones fisicoquímicas favorables para el crecimiento del sistema radical.

La respuesta observada coincide con investigaciones realizadas en especies forestales y agrícolas, donde la inoculación con PGPR favoreció el desarrollo del sistema radical. Angulo et al. (2014) reportaron incrementos significativos en la longitud de raíz de *Eucalyptus nitens* inoculado con rizobacterias promotoras del crecimiento. De manera similar Palacio et al. (2022) demostraron que la inoculación con *Bacillus paralicheniformis* y *Pseudomonas lini* incrementó el peso radicular de plantas de tomate cuando fueron cultivadas en suelo compostado. Asimismo Nwigwe et al. (2023) señalaron que la respuesta de las PGPR sobre el crecimiento radicular depende de la especie vegetal, la cepa bacteriana, la concentración del inóculo y las condiciones del medio de propagación, lo que explica la variabilidad observada entre los tratamientos evaluados.

Al comparar los resultados con investigaciones realizadas en especies del género *Polylepis*, el tratamiento T20 alcanzó una longitud promedio de raíz de 23.40 cm, superando lo reportado por Yana (2021), quien obtuvo 18.53 cm en esquejes de *Polylepis tomentella* tratados con AIB Rapid Root. Asimismo, el valor obtenido fue cercano al registrado por Huarhua (2017), quien reportó 27.67 cm en *Polylepis incana* mediante la combinación de un enraizante natural y un sustrato orgánico, aunque ligeramente inferior al informado por Bendezú (2025), quien alcanzó 25.98 cm utilizando el enraizador comercial ROOT-HOR. Estas diferencias probablemente se relacionan con la especie evaluada, el tipo de bioestimulante empleado, las condiciones ambientales y el manejo del proceso de propagación, factores ampliamente reconocidos por influir en la formación y elongación de raíces adventicias (Hartmann et al., 2011).

En conjunto, los resultados obtenidos demuestran que tanto el CM (2 compost de materia orgánica + ½arena + 3tierra agrícola) como la inoculación con *Bacillus* sp. a 1×10^8 UFC/mL favorecieron el desarrollo radicular de los esquejes de *Polylepis* sp. La obtención de raíces más largas constituye un indicador de un mejor establecimiento fisiológico del esqueje y representa una característica deseable para incrementar su supervivencia.

4.3.3. Altura

Con el propósito de evaluar el efecto de las cepas de rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR), los sustratos y su interacción sobre el incremento de la altura de los esquejes de *Polylepis* sp., se analizó la diferencia entre la altura considerando únicamente los esquejes que presentaron crecimiento durante los 90 días de evaluación. Los resultados del análisis de varianza (ANOVA) se presentan en la Tabla 18.

Tabla 18

Análisis de varianza para incremento de altura de los esquejes de Polylepis sp.

Fuente de variación	SC	gl	CM	F	p
Bloque	4.654	7	0.665	3.216	0.008
Sustrato	2.170	3	0.723	3.498	0.023
PGPR	2.795	6	0.466	2.253	0.055
Sustrato × PGPR	8.563	17	0.504	2.436	0.009
Error	9.304	45	0.207		
Total corregido	33.783	78			

Fuente: Elaboración propia, 2025.

El análisis de varianza mostró que el incremento de altura de los esquejes de *Polylepis* sp. estuvo influenciado significativamente por el sustrato ($p = 0.023$) y por la interacción sustrato × PGPR ($p = 0.009$). Por su parte, las PGPR no alcanzaron significancia estadística ($p = 0.055$). Estos resultados indican que la respuesta en altura estuvo asociada tanto al tipo de sustrato como a la combinación específica entre sustrato y PGPR. Con el propósito de identificar las diferencias entre las medias de los niveles de sustrato y PGPR para el incremento de altura, se realizó la prueba de comparación múltiple de Tukey ($\alpha = 0.05$). Los resultados se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 19*Prueba de Tukey para el incremento de la altura según PGPR y sustrato*

Factor		Nivel	Incremento de altura (cm)	Grupo
Sustrato	HL		4.12	a
	EB		3.92	ab
	CM		3.73	ab
	TA		3.58	b
PGPR	<i>Pseudomonas</i> sp.	1×10^8 UFC/mL	4.36	a
	<i>Bacillus</i> sp.	1×10^6 UFC/mL	3.98	ab
	<i>Bacillus</i> sp.	1×10^8 UFC/mL	3.79	abc
	<i>Bacillus</i> sp.	1×10^4 UFC/mL	3.71	bc
	<i>Pseudomonas</i> sp.	1×10^6 UFC/mL	3.64	bc
	Control		3.54	bc
	<i>Pseudomonas</i> sp.	1×10^4 UFC/mL	3.32	c

Fuente: Elaboración propia, 2025.

Según la Tabla 19, la prueba de comparación múltiple de Tukey permitió identificar diferencias y agrupaciones homogéneas entre los niveles de sustrato y PGPR respecto al incremento de altura. En cuanto a las PGPR, *Pseudomonas* sp. a 1×10^8 UFC/mL presentó el mayor incremento promedio de altura (4.36 cm) y se ubicó en el grupo estadístico a, seguido por *Bacillus* sp. a 1×10^6 UFC/mL (3.98 cm; ab) y 1×10^8 UFC/mL (3.79 cm; abc). El menor incremento promedio correspondió a *Pseudomonas* sp. a 1×10^4 UFC/mL, con 3.32 cm, ubicado en el grupo c. De acuerdo con los grupos de Tukey, *Pseudomonas* sp. a 1×10^8 UFC/mL y *Pseudomonas* sp. a 1×10^4 UFC/mL no compartieron subconjuntos, evidenciándose diferencia significativa entre ambos niveles.

Respecto a los sustratos, HL (2 partes de humus de lombriz + $\frac{1}{2}$ parte de arena + 3 partes de tierra agrícola) presentó el mayor incremento promedio de altura (4.12 cm) y se ubicó en el grupo a. EB (2 partes de estiércol bovino + $\frac{1}{2}$ parte de arena + 3 partes de tierra agrícola) y CM (2 partes de compost de materia orgánica + $\frac{1}{2}$ parte de arena + 3 partes de tierra agrícola) registraron medias de

3.92 y 3.73 cm, respectivamente, y se clasificaron en el grupo ab. Finalmente, TA presentó el menor incremento promedio (3.58 cm) y se ubicó en el grupo b, evidenciándose una diferencia significativa entre HL y TA, al no compartir grupos homogéneos.

Debido a que la interacción sustrato $\times$ PGPR presentó un efecto significativo sobre el incremento de altura, se realizó la prueba de Tukey para comparar las medias de las combinaciones evaluadas. Los resultados se presentan a continuación.

Tabla 20

Comparación de medias de los tratamientos para incremento de altura mediante la prueba de Tukey

Tratamiento	Sustrato	PGPR	Incremento de altura (cm)	Grupo
T10	EB	<i>Pseudomonas</i> sp. 1×10^8	5.40	a
T2	HL	<i>Pseudomonas</i> sp. 1×10^6	4.50	ab
T3	HL	<i>Pseudomonas</i> sp. 1×10^8	4.47	ab
T5	HL	<i>Bacillus</i> sp. 1×10^6	4.25	ab
T6	HL	<i>Bacillus</i> sp. 1×10^8	4.20	ab
T19	CM	<i>Bacillus</i> sp. 1×10^6	4.18	ab
T12	EB	<i>Bacillus</i> sp. 1×10^6	4.00	b
T18	CM	<i>Bacillus</i> sp. 1×10^4	3.90	b
T17	CM	<i>Pseudomonas</i> sp. 1×10^8	3.90	b
T27	TA	<i>Bacillus</i> sp. 1×10^8	3.87	b
T11	EB	<i>Bacillus</i> sp. 1×10^4	3.73	b
T21	CM	Control	3.70	b
T13	EB	<i>Bacillus</i> sp. 1×10^8	3.70	b
T26	TA	<i>Bacillus</i> sp. 1×10^6	3.63	b
T28	TA	Control	3.60	b
T4	HL	<i>Bacillus</i> sp. 1×10^4	3.55	b
T20	CM	<i>Bacillus</i> sp. 1×10^8	3.50	b
T24	TA	<i>Pseudomonas</i> sp. 1×10^8	3.50	b
T16	CM	<i>Pseudomonas</i> sp. 1×10^6	3.45	b

Tratamiento	Sustrato	PGPR	Incremento de altura (cm)	Grupo
T25	TA	<i>Bacillus</i> sp. 1×10^4	3.45	b
T7	HL	Control	3.40	b
T14	EB	Control	3.40	b
T15	CM	<i>Pseudomonas</i> sp. 1×10^4	3.37	b
T1	HL	<i>Pseudomonas</i> sp. 1×10^4	3.30	b
T23	TA	<i>Pseudomonas</i> sp. 1×10^6	3.30	b
T9	EB	<i>Pseudomonas</i> sp. 1×10^6	3.27	b
T8	EB	<i>Pseudomonas</i> sp. 1×10^4	3.25	b

Fuente: Elaboración propia, 2025.

La comparación múltiple de los tratamientos mostró que T10, correspondiente a EB (2 estiércol bovino + $\frac{1}{2}$ arena + 3 tierra agrícola) enriquecido con *Pseudomonas* sp. a 1×10^8 UFC/mL, presentó el mayor incremento promedio de altura (5.40 cm) y se ubicó en el grupo a. Le siguieron T2 (HL + *Pseudomonas* sp. 1×10^6 UFC/mL), con 4.50 cm; T3 (HL + *Pseudomonas* sp. 1×10^8 UFC/mL), con 4.47 cm; T5 (HL + *Bacillus* sp. 1×10^6 UFC/mL), con 4.25 cm; T6 (HL + *Bacillus* sp. 1×10^8 UFC/mL), con 4.20 cm; y T19 (CM + *Bacillus* sp. 1×10^6 UFC/mL), con 4.18 cm, todos incluidos en el grupo ab. Los menores incrementos se registraron en T8 (3.25 cm) y T9 (3.27 cm), ambos pertenecientes al grupo b. Estos resultados son concordantes con el efecto significativo de la interacción sustrato $\times$ PGPR ($p = 0.009$), indicando que la respuesta en altura estuvo condicionada por la combinación específica de ambos factores.

El crecimiento en altura constituye un indicador del restablecimiento fisiológico del esqueje, ya que refleja la reactivación de los meristemas apicales y el desarrollo de nuevos tejidos vegetativos (Taiz et al., 2015). En el presente estudio, aunque las PGPR no mostraron un efecto significativo de manera independiente ($p = 0.055$), *Pseudomonas* sp. a 1×10^8 UFC/mL presentó el mayor incremento promedio entre los niveles evaluados, con 4.36 cm. Este comportamiento podría relacionarse con mecanismos propios del género, como la producción de fitohormonas, la actividad ACC desaminasa y el

incremento en la disponibilidad de nutrientes, procesos asociados con la elongación y el desarrollo de la parte aérea. De manera similar, Zulueta et al. (2015) reportaron incrementos en la altura de plántulas de *Abies hickelii* inoculadas con *Pseudomonas fluorescens* y *P. putida*. Asimismo, Salomon et al. (2017) observaron una tendencia al incremento de la longitud del tallo en estacas de vid inoculadas con *Pseudomonas fluorescens*. Estos antecedentes muestran el potencial de estas bacterias para favorecer el crecimiento vegetal, aunque su respuesta puede depender de la cepa, concentración, especie vegetal y condiciones de cultivo.

En cuanto a los sustratos, HL presentó el mayor incremento promedio de altura (4.12 cm), seguido del EB (3.92 cm), CM (3.73 cm) y TA (3.58 cm). Este efecto podría estar relacionado con las propiedades físicas y biológicas del humus de lombriz. El vermicompost incrementa la disponibilidad de agua y nutrientes, favorece la actividad microbiana, condiciones que pueden favorecer la división y elongación celular del tallo (Blouin et al., 2019). En concordancia con ello, Damtew et al. (2019) registraron un incremento en la altura de plántulas de *Olea europaea* cultivadas con vermicompost, mientras que Atik (2014) obtuvo una respuesta similar en plántulas de pino negro de Anatolia.

Al comparar estos resultados con investigaciones realizadas en especies del género *Polylepis*, el tratamiento T10 (EB + *Pseudomonas* sp. a 1×10^8 UFC/mL) alcanzó un incremento promedio de 5.40 cm, valor cercano a los 5.98 cm reportados por Romero (2021) utilizando agua de coco, humus y arena en la propagación de esquejes de queñua. Asimismo, fue inferior a los 7.10 cm informados por Pacco (2022) en un sustrato compuesto por estiércol de ovino + arena + tierra agrícola. Por otro lado, Quispe (2013) registró incrementos de 13.03 cm con extracto de sauce y 10.19 cm con agua de coco en *Polylepis besseri*. Estas diferencias podrían estar relacionadas con la especie evaluada, la composición del sustrato, las condiciones y el periodo de evaluación.

En conjunto, los resultados evidencian que el sustrato y la interacción sustrato $\times$ PGPR influyeron significativamente en el incremento de altura de los esquejes de *Polylepis* sp. Aunque las PGPR no presentaron un efecto significativo de manera independiente, su respuesta varió según el sustrato con

el que fueron combinadas. En este sentido T10 (EB + *Pseudomonas* sp. 1×10^8 UFC/mL) presentó el mayor incremento promedio de altura. Estos resultados muestran que el desarrollo en altura no dependió exclusivamente de uno de los factores, sino de la combinación entre el sustrato y la inoculación bacteriana.

4.3.4. Número de folíolos

El número de folíolos de los esquejes de *Polylepis* sp. fue evaluado mediante conteo directo a los 30, 60 y 90 días después de la instalación del experimento. Con el propósito de determinar el efecto de las rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR), los sustratos y su interacción sobre esta variable en cada periodo de evaluación, se realizó un análisis de varianza (ANOVA), complementado con la prueba de comparación múltiple de Tukey. Los resultados correspondientes a los 30, 60 y 90 días se presentan en las tablas siguientes. Finalmente, para los 90 días, se presenta el análisis de la interacción entre los factores, debido a que corresponde a la respuesta final del experimento cuyos resultados se expresan en la tabla 27.

a) Número de folíolos a los 30 días

El número de folíolos presentes en los esquejes de *Polylepis* sp. a los 30 días fue evaluado mediante un análisis de varianza (ANOVA) factorial para determinar la influencia de los sustratos enriquecidos con PGPR durante la fase inicial del establecimiento.

Tabla 21

Análisis de varianza para el número de folíolos a los 30 días de esquejes de Polylepis sp.

Fuente de variación	SC	Gl	CM	F	p
Bloque	15.703	7	2.243	0.464	0.855
Sustrato	51.673	3	17.224	3.566	0.021
PGPR	105.844	6	17.641	3.652	0.005
Sustrato × PGPR	102.078	17	6.005	1.243	0.270
Error	231.847	48	4.830		
Total corregido	564.988	81			

Fuente: Elaboración propia, 2025.

En la Tabla 21 se presenta el análisis de varianza para el número de folíolos a los 30 días, donde se observa que el sustrato ($p = 0.021$) y las rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR) ($p = 0.005$) ejercieron un efecto significativo sobre esta variable. En contraste, la interacción entre ambos factores ($p = 0.270$) y el efecto del bloque ($p = 0.855$) no fueron estadísticamente significativos. Estos resultados indican que la emisión de folíolos a los 30 días estuvo influenciada por los efectos individuales del sustrato y las PGPR, sin evidenciarse un efecto conjunto significativo entre ambos factores.

Al encontrarse diferencias significativas mediante el análisis de varianza, se aplicó la prueba de comparación múltiple de Tukey para identificar los tratamientos que difirieron estadísticamente entre sí.

Tabla 22

Prueba de Tukey para el número de folíolos a los 30 días según PGPR y sustrato

Factor	Nivel	Número de folíolos	Grupo
Sustrato	EB	5.26	a
	TA	4.40	ab
	HL	3.31	b
	CM	3.18	b
PGPR	<i>Pseudomonas</i> sp. 1×10^8 UFC/mL	6.00	a
	<i>Bacillus</i> sp. 1×10^8 UFC/mL	5.47	ab
	Control	4.13	abc
	<i>Bacillus</i> sp. 1×10^4 UFC/mL	3.64	abc
	<i>Bacillus</i> sp. 1×10^6 UFC/mL	2.87	bc
	<i>Pseudomonas</i> sp. 1×10^6 UFC/mL	2.69	bc
	<i>Pseudomonas</i> sp. 1×10^4 UFC/mL	2.00	c

Fuente: Elaboración propia, 2025.

En la Tabla 22, la prueba de Tukey mostró diferencias significativas entre los niveles de los factores evaluados. En cuanto al sustrato, EB (2 estiércol bovino + ½ arena + 3 tierra agrícola) presentó el mayor número promedio de folíolos (5.26), ubicándose en el grupo a, seguido por la tierra agrícola (TA) con 4.40 folíolos, clasificada en el grupo ab. Por su parte, HL (2 humus de lombriz + ½ arena + 3 tierra agrícola) y CM (2 compost de materia orgánica + ½ arena + 3 tierra agrícola) registraron los menores promedios, con 3.31 y 3.18 folíolos, respectivamente, ambos pertenecientes al grupo b.

Respecto a las PGPR, *Pseudomonas* sp. a 1×10^8 UFC/mL presentó el mayor número promedio de folíolos (6.00), ubicándose en el grupo a, seguido de *Bacillus* sp. a 1×10^8 UFC/mL con 5.47 folíolos, clasificado en el grupo ab. En contraste, *Pseudomonas* sp. a 1×10^4 UFC/mL registró el menor promedio (2.00), perteneciendo al grupo c, mientras que los demás tratamientos presentaron valores intermedios y compartieron grupos estadísticos.

A los 30 días, el número de folíolos estuvo influenciado de manera independiente por el tipo de sustrato y las PGPR. Durante esta etapa inicial de establecimiento, los esquejes atravesaron procesos de adaptación y enraizamiento, observándose en algunos tratamientos caída de hojas asociada al estrés inicial. Esta condición podría haber contribuido a la variabilidad observada en el número de folíolos; sin embargo, la interacción entre sustrato y PGPR no fue significativa.

b) Número de folíolos a los 60 días

El número de folíolos registrado a los 60 días fue analizado mediante un análisis de varianza (ANOVA) factorial con el fin de evaluar la respuesta de los esquejes a los tratamientos durante el desarrollo vegetativo intermedio.

Tabla 23

Análisis de varianza para el número de folíolos a los 60 días de esquejes de Polylepis sp.

Fuente de variación	SC	gl	CM	F	p
Bloque	47.629	7	6.804	0.561	0.783
Sustrato	234.415	3	78.138	6.446	0.001
PGPR	122.179	6	20.363	1.680	0.146
Sustrato × PGPR	257.447	17	15.144	1.249	0.266
Error	581.854	48	12.122		
Total corregido	1330.744	81			

Fuente: Elaboración propia, 2025.

En la Tabla 23 se muestra el análisis de varianza para el número de folíolos a los 60 días, donde se observa que el sustrato ejerció un efecto significativo sobre esta variable ($p = 0.001$). En contraste, las rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR) ($p = 0.146$), el bloque ($p = 0.783$) y la interacción entre sustrato y PGPR ($p = 0.266$) no presentaron efectos estadísticamente significativos. Estos resultados indican que el número de folíolos a los 60 días estuvo influenciado principalmente por el tipo de sustrato.

La comparación de los tratamientos se realizó mediante la prueba de Tukey, permitiendo identificar los grupos homogéneos entre las medias evaluadas.

Tabla 24

Prueba de Tukey para el número de folíolos a los 60 días según PGPR y sustrato

Factor	Nivel	Número de folíolos	Grupo
Sustrato	EB	13.35	a
	HL	10.25	b
	TA	9.40	b
	CM	9.32	b
PGPR	<i>Pseudomonas</i> sp. 1×10^8 UFC/mL	14.00	a
	<i>Bacillus</i> sp. 1×10^8 UFC/mL	10.87	ab
	Control	10.25	ab
	<i>Bacillus</i> sp. 1×10^4 UFC/mL	9.91	ab
	<i>Bacillus</i> sp. 1×10^6 UFC/mL	9.80	ab
	<i>Pseudomonas</i> sp. 1×10^6 UFC/mL	9.77	ab
	<i>Pseudomonas</i> sp. 1×10^4 UFC/mL	8.17	b

Fuente: Elaboración propia, 2025.

En la Tabla 24, la prueba de Tukey mostró diferencias entre los niveles de sustrato evaluados. EB (2 estiércol bovino + $\frac{1}{2}$ arena + 3 tierra agrícola) presentó el mayor número promedio de folíolos (13.35), ubicándose en el grupo a, mientras que HL(2 humus de lombriz + $\frac{1}{2}$ arena + 3 tierra agrícola), la tierra agrícola (TA) y CM (2 compost de materia orgánica + $\frac{1}{2}$ arena + 3 tierra agrícola) registraron promedios de 10.25, 9.40 y 9.32 folíolos, respectivamente, y conformaron el grupo b. En cuanto a las PGPR, *Pseudomonas* sp. a 1×10^8 UFC/mL presentó el mayor promedio (14 folíolos), seguido de *Bacillus* sp. a 1×10^8 UFC/mL (10.87 folíolos) y *Pseudomonas* sp. a 1×10^4 UFC/mL registró el menor valor (8.17 folíolos).

c) Número de folíolos a los 90 días

El número de folíolos a los 90 días fue analizado mediante un análisis de varianza (ANOVA) factorial para determinar el efecto del sustrato, la inoculación con PGPR y su interacción sobre el desarrollo foliar de los esquejes de *Polylepis* sp.

Tabla 25*Análisis de varianza para el número de folíolos a los 90 días*

Fuente de variación	SC	gl	CM	F	p
Bloque	68.280	7	9.754	0.581	0.768
Sustrato	449.758	3	149.919	8.935	< 0.001
PGPR	58.276	6	9.713	0.579	0.745
Sustrato × PGPR	359.568	17	21.151	1.261	0.258
Error	805.404	48	16.779		
Total corregido	1803.524	81			

Fuente: Elaboración propia, 2025.

El análisis de varianza mostró que el número de folíolos de los esquejes de *Polylepis* sp. fue influenciado significativamente por el tipo de sustrato ($p < 0.001$). En contraste, los tratamientos con PGPR no presentaron un efecto estadísticamente significativo sobre esta variable ($p=0.745$). Asimismo, la interacción entre sustrato y PGPR no mostró diferencias significativas ($p=0.258$), al igual que el efecto del bloque ($p=0.768$).

Tabla 26*Prueba Tukey para el número de folíolos según PGPR y sustrato.*

Factor	Nivel	Número de folíolos	Grupo
Sustrato	EB	19.61	a
	HL	16.25	ab
	CM	14.50	b
	TA	13.73	b
PGPR	<i>Pseudomonas</i> sp. 1×10^8 UFC/mL	18.86	a
	Control	16.25	a
	<i>Bacillus</i> sp. 1×10^8 UFC/mL	16.07	a
	<i>Pseudomonas</i> sp. 1×10^6 UFC/mL	15.69	a
	<i>Bacillus</i> sp. 1×10^4 UFC/mL	15.45	a
	<i>Bacillus</i> sp. 1×10^6 UFC/mL	15.20	a
	<i>Pseudomonas</i> sp. 1×10^4 UFC/mL	14.33	a

Fuente: Elaboración propia, 2025.

La tabla 26 muestra diferencias significativas entre los niveles del factor sustrato respecto al número de folíolos de los esquejes de *Polylepis* sp. a los 90 días. Donde EB (2 estiércol bovino + ½ arena + 3 tierra agrícola) presentó el mayor número promedio de folíolos (19.61), ubicándose en el grupo a, mientras que HL (2 humus de lombriz + ½ arena + 3 tierra agrícola) alcanzó un valor intermedio de 16.25 folíolos y se clasificó en el grupo ab. Por su parte, el CM (2 compost de materia orgánica + ½ arena + 3 tierra agrícola) y tierra agrícola (TA) registraron los menores promedios, con 14.50 y 13.73 folíolos, respectivamente, ambos pertenecientes al grupo b.

En cuanto al factor PGPR, *Pseudomonas* sp. a 1×10^8 UFC/mL presentó numéricamente el mayor promedio de folíolos (18.86), seguido del control (16.25) y *Bacillus* sp. a 1×10^8 UFC/mL (16.07). Sin embargo, todos los niveles de PGPR conformaron un único grupo homogéneo a, indicando que no existieron diferencias estadísticamente significativas entre ellos. En conjunto, estos resultados evidencian que el desarrollo foliar a los 90 días estuvo influenciado principalmente por el tipo de sustrato, destacando el estiércol bovino, mientras que las PGPR no mostraron un efecto significativo sobre esta variable. Posteriormente, se realizó la prueba de comparación múltiple de Tukey para evaluar el comportamiento de las medias entre los tratamientos, cuyos resultados se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 27

Comparación de medias de los tratamientos del número de folíolos a los 90 días mediante la prueba de Tukey.

Tratamiento	Sustrato	PGPR	Media	Grupo
T10	EB	<i>Pseudomonas</i> sp. 1×10^8	24.25	a
T11	EB	<i>Bacillus</i> sp. 1×10^4	21.00	ab
T14	EB	Control	20.00	ab
T17	CM	<i>Pseudomonas</i> sp. 1×10^8	19.50	ab
T9	EB	<i>Pseudomonas</i> sp. 1×10^6	19.00	ab

Tratamiento	Sustrato	PGPR	Media	Grupo
T1	HL	<i>Pseudomonas</i> sp. 1×10^4	19.00	ab
T12	EB	<i>Bacillus</i> sp. 1×10^6	18.50	ab
T8	EB	<i>Pseudomonas</i> sp. 1×10^4	18.00	ab
T6	HL	<i>Bacillus</i> sp. 1×10^8	18.00	ab
T3	HL	<i>Pseudomonas</i> sp. 1×10^8	17.67	ab
T5	HL	<i>Bacillus</i> sp. 1×10^6	16.50	ab
T26	TA	<i>Bacillus</i> sp. 1×10^6	16.25	ab
T20	CM	<i>Bacillus</i> sp. 1×10^8	16.20	ab
T13	EB	<i>Bacillus</i> sp. 1×10^8	16.00	ab
T7	HL	Control	16.00	ab
T16	CM	<i>Pseudomonas</i> sp. 1×10^6	15.75	ab
T4	HL	<i>Bacillus</i> sp. 1×10^4	15.00	ab
T23	TA	<i>Pseudomonas</i> sp. 1×10^6	14.50	ab
T21	CM	Control	14.00	ab
T27	TA	<i>Bacillus</i> sp. 1×10^8	14.00	ab
T18	CM	<i>Bacillus</i> sp. 1×10^4	13.75	ab
T2	HL	<i>Pseudomonas</i> sp. 1×10^6	13.75	ab
T28	TA	Control	12.00	ab
T24	TA	<i>Pseudomonas</i> sp. 1×10^8	12.00	b
T19	CM	<i>Bacillus</i> sp. 1×10^6	11.20	b
T25	TA	<i>Bacillus</i> sp. 1×10^4	11.00	b
T15	CM	<i>Pseudomonas</i> sp. 1×10^4	10.33	b

Fuente: Elaboración propia, 2025.

La comparación de medias de las combinaciones PGPR $\times$ sustrato mostró que el tratamiento T10, correspondiente a EB con *Pseudomonas* sp. a 1×10^8 UFC/mL, presentó el mayor número promedio de folíolos a los 90 días, con 24.25 folíolos, ubicándose en el grupo a. Le siguieron T11 (EB + *Bacillus* sp. 1×10^4 UFC/mL) con 21.00 folíolos y T14 (EB + control) con 20.00 folíolos, ambos clasificados en el grupo ab. En contraste, entre los menores valores se encontraron T15 (CM + *Pseudomonas* sp. 1×10^4

UFC/mL) con 10.33 folíolos, T25 (TA + *Bacillus* sp. 1×10^4 UFC/mL) con 11.00 y T19 (CM + *Bacillus* sp. 1×10^6 UFC/mL) con folíolos, pertenecientes al grupo b.

Durante los primeros 30 días se observó una disminución del número de folíolos en varios tratamientos, seguida de una recuperación progresiva a los 60 y 90 días. Esta respuesta puede atribuirse al estrés inicial cuando no se disponía de un sistema radical capaz de compensar la pérdida de agua por transpiración. Hartmann et al. (2011) señalan que, en esta etapa, los esquejes experimentan un desbalance hídrico que puede provocar la caída parcial de hojas o folíolos como mecanismo para reducir la pérdida de agua. Posteriormente, Druege (2020) indica que, conforme se forman las raíces adventicias y se restablece el equilibrio hídrico, se reactiva el crecimiento vegetativo y la emisión de nuevo tejido foliar.

En el presente estudio, los efectos del sustrato y de las PGPR fueron significativos de manera independiente a los 30 días. Sin embargo, la interacción entre ambos factores no fue significativa. A los 60 y 90 días, únicamente el sustrato mantuvo un efecto significativo, lo que indica que, conforme avanzó el crecimiento de los esquejes, las condiciones proporcionadas por el sustrato tuvieron una mayor influencia sobre el desarrollo de los folíolos que la inoculación con PGPR.

A los 90 días, *Pseudomonas* sp. a 1×10^8 UFC/mL presentó el mayor número promedio de folíolos. Henning et al. (2016), en *Populus trichocarpa*, demostraron que la inoculación con cepas de *Pseudomonas* incrementó significativamente el número de hojas, la biomasa foliar y la expansión del área foliar, evidenciando su capacidad para estimular el desarrollo de los tejidos aéreos. En la presente investigación, la mayor concentración bacteriana favoreció una colonización más eficiente de la rizosfera y, en consecuencia, un mayor desarrollo foliar de los esquejes. Respecto al sustrato, el estiércol bovino presentó el mayor número de folíolos. Este comportamiento puede asociarse con la liberación gradual de nitrógeno durante la mineralización de la materia orgánica, proceso que favorece la formación de clorofila, proteínas y nuevos tejidos foliares.

Biernond et al. (1995) demostraron que una mayor disponibilidad de nitrógeno incrementa la aparición de las hojas, favoreciendo el desarrollo foliar. En consecuencia, el suministro continuo de este nutriente pudo contribuir a la formación sostenida de nuevos folíolos durante el establecimiento de los esquejes.

Al comparar los resultados con estudios realizados en especies del género *Polylepis*, se observan diferencias en el desarrollo foliar. Ramos (2024), en esquejes de *Polylepis* sp., registró a los 90 días un máximo de 8.50 hojas por esqueje en el tratamiento compuesto por suelo agrícola y estiércol vacuno, coincidiendo con el comportamiento favorable del estiércol bovino observado en la presente investigación. Asimismo, Huarhua (2017) evaluó el número de hojas y obtuvo a los 90 días hasta 7.67 hojas por esqueje. Quispe (2021), por su parte, registró a los 90 días un máximo de 14.73 hojas por esqueje en *Polylepis incana* con el enraizador químico Root-Hor. Estos resultados muestran una magnitud de desarrollo foliar comparable, ya que se debe tener en cuenta que en la presente investigación se registraron individualmente los folíolos que conformaban cada hoja compuesta constituida aproximadamente por 3 a 5 folíolos.

En estudios que evaluaron específicamente folíolos también se registraron valores considerablemente menores. Valenzuela (2014) reportó a los 90 días un máximo de 4.38 folíolos en *Polylepis incana*, valor notablemente inferior a los 24.25 folíolos registrados en el tratamiento T10 de la presente investigación. Estas diferencias estarían relacionadas con las condiciones de propagación, el tipo de sustrato, los enraizadores utilizados, el material vegetal y el criterio de evaluación empleado en cada estudio.

4.3.5. Numero de brotes

El número de brotes de los esquejes de *Polylepis* sp. fue evaluado mediante conteo directo a los 30, 60 y 90 días después de la instalación del experimento. Con el propósito de determinar el efecto de las rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR), los sustratos y su interacción sobre esta variable en cada periodo de evaluación, se realizó un análisis de varianza (ANOVA), complementado con la prueba de comparación múltiple de Tukey. Los

resultados correspondientes a los 30, 60 y 90 días se presentan en las tablas siguientes. Finalmente, para los 90 días, se presenta el análisis de la interacción entre los factores, debido a que corresponde a la respuesta final del experimento.

a) Número de brotes a los 30 días

El número de brotes emitidos por los esquejes de *Polylepis* sp. a los 30 días fue evaluado para determinar el efecto de los sustratos enriquecidos con PGPR sobre la emisión inicial de brotes. Los resultados del análisis de varianza se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 28

Análisis de varianza para el número de brotes a los 30 días de esquejes de Polylepis sp.

Fuente de variación	gl	SC	CM	F	p
Bloque	7	0.970	0.139	0.508	0.824
Sustrato	3	1.002	0.334	1.223	0.312
PGPR	6	0.964	0.161	0.588	0.738
Sustrato × PGPR	17	2.148	0.126	0.463	0.957
Error	46	12.563	0.273		
Total corregido	79	18.187			

Fuente: Elaboración propia, 2025.

El análisis de varianza del número de brotes registrado a los 30 días se presenta en la Tabla 28, donde se observa que el bloque ($p=0.824$), el sustrato ($p=0.312$), PGPR ($p=0.738$) y la interacción entre ambos factores ($p=0.957$) no ejercieron efectos significativos sobre esta variable. Estos resultados indican que el número de brotes emitidos durante los primeros 30 días fue similar entre los tratamientos evaluados, sin evidenciar una influencia del tipo de sustrato, la inoculación con PGPR ni de la combinación entre ambos factores. Con el fin de identificar el agrupamiento estadístico de los tratamientos evaluados, se aplicó la prueba de comparación múltiple de Tukey, cuyos resultados se presentan a continuación.

Tabla 29

Prueba de Tukey para el número de brotes a los 30 días según PGPR y sustrato

Factor	Tratamiento	Número de brotes	Grupo
Sustrato	CM	1.30	a
	EB	1.26	a
	HL	1.07	a
	TA	1.00	a
PGPR	<i>Bacillus</i> sp. 1×10^6 UFC/mL	1.29	a
	<i>Pseudomonas</i> sp. 1×10^8 UFC/mL	1.29	a
	<i>Bacillus</i> sp. 1×10^8 UFC/mL	1.27	a
	<i>Bacillus</i> sp. 1×10^4 UFC/mL	1.18	a
	<i>Pseudomonas</i> sp. 1×10^4 UFC/mL	1.17	a
	Control	1.00	a
	<i>Pseudomonas</i> sp. 1×10^6 UFC/mL	1.00	a

Fuente: Elaboración propia, 2025.

En la Tabla 29, la prueba de Tukey mostró que no existieron diferencias significativas entre los tratamientos evaluados. En el caso del sustrato, CM (2 compost de materia orgánica + $\frac{1}{2}$ arena + 3 tierra agrícola) presentó el mayor número promedio de brotes (1.30), seguido EB (2 estiércol bovino + $\frac{1}{2}$ arena + 3 tierra agrícola) con 1.26, HL (2 humus de lombriz + $\frac{1}{2}$ arena + 3 tierra agrícola) con 1.07 y la tierra agrícola con 1.00 brotes. Sin embargo, todos pertenecieron al mismo grupo homogéneo. De igual manera, para las PGPR, *Bacillus* 1×10^6 y *Pseudomonas* 1×10^8 registraron el mayor promedio de brotes (1.29), mientras que el control presento los menores valores (1.00). Estos resultados confirman que ni el tipo de sustrato ni la inoculación con PGPR influyeron significativamente en la emisión de brotes durante los primeros 30 días.

b) Número de brotes a los 60 días

El número de brotes registrado en los esquejes de *Polylepis* sp. a los 60 días fue evaluado para determinar la respuesta de los tratamientos durante el desarrollo vegetativo intermedio. Los resultados del análisis de varianza se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 30

Análisis de varianza para el número de brotes a los 60 días de esquejes de Polylepis sp.

Fuente de variación	gl	SC	CM	F	p
Bloque	7	0.834	0.119	0.415	0.888
Sustrato	3	0.686	0.229	0.797	0.502
PGPR	6	0.604	0.101	0.351	0.906
Sustrato × PGPR	17	3.094	0.182	0.634	0.846
Error	46	13.199	0.287		
Total corregido	79	18.800			

Fuente: Elaboración propia, 2025.

La Tabla 30 muestra los resultados del análisis de varianza correspondiente al número de brotes evaluado a los 60 días, donde se observa que el bloque ($p = 0.888$), el sustrato ($p = 0.502$), las rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR) ($p = 0.906$) y la interacción entre ambos factores ($p = 0.846$) no ejercieron efectos estadísticamente significativos sobre esta variable. Estos resultados indican que el número de brotes emitidos a los 60 días fue similar entre los tratamientos evaluados, sin evidenciar una influencia del tipo de sustrato, la inoculación con PGPR ni de la combinación entre ambos factores. Además, se aplicó la prueba de comparación múltiple de Tukey, cuyos resultados se presentan en la tabla a continuación:

Tabla 31

Prueba de Tukey para el número de brotes a los 60 días según PGPR y sustrato

Factor	Tratamiento	Número de brotes	Grupo
Sustrato	CM	1.30	a
	EB	1.26	a
	HL	1.07	a
	TA	1.07	a
PGPR	<i>Bacillus</i> sp. 1×10^6 UFC/mL	1.29	a
	<i>Pseudomonas</i> sp. 1×10^8 UFC/mL	1.29	a
	<i>Bacillus</i> sp. 1×10^8 UFC/mL	1.27	a
	<i>Bacillus</i> sp. 1×10^4 UFC/mL	1.18	a
	<i>Pseudomonas</i> sp. 1×10^4 UFC/mL	1.17	a
	<i>Pseudomonas</i> sp. 1×10^6 UFC/mL	1.08	a
	Control	1.00	a

Fuente: Elaboración propia, 2025.

En la Tabla 31, la prueba de Tukey mostró que no existieron diferencias significativas entre los tratamientos evaluados. En el caso del sustrato, CM presentó el mayor número promedio de brotes (1.30), seguido EB con 1.26, mientras que HL y la tierra agrícola (TA) registraron el menor promedio (1.07). Respecto a las PGPR, *Bacillus* 1×10^6 y *Pseudomonas* 1×10^8 alcanzaron el mayor número promedio de brotes (1.29), seguidos por *Bacillus* 1×10^8 (1.27), mientras que el tratamiento control presentó el menor promedio (1.00). Sin embargo, todos los tratamientos pertenecieron al mismo grupo homogéneo, indicando que las diferencias observadas no fueron estadísticamente significativas.

c) Número de brotes a los 90 días

Al finalizar el periodo de evaluación, se determinó el número de brotes emitidos por los esquejes de *Polylepis* sp. con el fin de establecer el efecto de los sustratos enriquecidos con PGPR sobre el desarrollo vegetativo.

Tabla 32

Análisis de varianza para el número de brotes a los 90 días de esquejes de Polylepis sp.

Fuente de variación	SC	gl	CM	F	p
Bloque	1.459	7	0.208	0.481	0.843
Sustrato	1.627	3	0.542	1.253	0.302
PGPR	0.626	6	0.104	0.241	0.960
Sustrato × PGPR	3.481	17	0.205	0.473	0.953
Error	19.908	46	0.433		
Total corregido	27.950	79			

Fuente: Elaboración propia, 2025.

El análisis de varianza mostró que el modelo no fue estadísticamente significativo ($p = 0.957$), indicando que los factores evaluados no explicaron la variación observada en el número de brotes de los esquejes de *Polylepis* sp. a los 90 días. El factor sustrato no presentó un efecto significativo sobre el número de brotes ($p = 0.302$), al igual que el factor PGPR ($p = 0.960$). De igual manera, la interacción PGPR × sustrato tampoco fue significativa ($p = 0.953$), indicando que la emisión de brotes no fue influenciada significativamente por ninguno de los factores evaluados ni por su interacción durante el periodo de estudio.

A continuación, se presentan los resultados de la prueba de comparación múltiple de Tukey ($\alpha = 0.05$), empleada para establecer las diferencias estadísticas entre los tratamientos evaluados.

Tabla 33

Prueba de Tukey para el número de brotes a los 90 días según PGPR y sustrato

Factor	Nivel	Media	Grupo
PGPR	<i>Pseudomonas</i> sp. 1×10^8 UFC/mL	1.36	a
	<i>Bacillus</i> sp. 1×10^6 UFC/mL	1.36	a
	<i>Bacillus</i> sp. 1×10^8 UFC/mL	1.33	a
	<i>Pseudomonas</i> sp. 1×10^6 UFC/mL	1.25	a
	<i>Bacillus</i> sp. 1×10^4 UFC/mL	1.18	a
	<i>Pseudomonas</i> sp. 1×10^4 UFC/mL	1.17	a
	Control	1.13	a
Sustrato	EB	1.48	a
	CM	1.33	a
	HL	1.07	a
	TA	1.07	a

Fuente: Elaboración propia, 2025.

La prueba de comparación múltiple de Tukey confirmó la ausencia de diferencias significativas entre los niveles del factor PGPR respecto al número de brotes de los esquejes de *Polylepis* sp. a los 90 días. Aunque *Pseudomonas* sp. a 1×10^8 UFC/mL y *Bacillus* sp. a 1×10^6 UFC/mL registraron las mayores medias (1.36 brotes), mientras que el tratamiento control presentó la menor media (1.13 brotes), todos los tratamientos conformaron un único grupo homogéneo.

De manera similar, el factor sustrato tampoco presentó diferencias significativas. El sustrato EB registró la mayor media (1.48 brotes), seguido de CM con 1.33 brotes, mientras que HL y TA presentaron las menores medias (1.07 brotes). Sin embargo, todos los sustratos pertenecieron al mismo grupo estadístico, indicando que las diferencias observadas no fueron significativas.

A partir de estos resultados se evidencio que los tratamientos evaluados no modificaron significativamente el número de brotes de *Polylepis* sp. Sin embargo, la brotación observada representa una respuesta importante dentro del proceso de establecimiento vegetativo. La falta de significancia estadística no descarta el efecto favorable de los sustratos orgánicos y las rizobacterias sobre otras variables de crecimiento, si no que sugiere que la emisión de brotes podría requerir un mayor tiempo de evaluación para expresar diferencias más notables entre tratamientos. Asimismo, se evaluó la interacción entre los factores sustrato y PGPR mediante la prueba de comparación múltiple de Tukey, con el propósito de identificar el comportamiento de los tratamientos combinados.

Tabla 34

Comparación de medias de los tratamientos del número de brotes a los 90 días mediante la prueba de Tukey.

Tratamiento	Sustrato	PGPR	Media	Grupo
T10	EB	<i>Pseudomonas</i> sp. 1×10^8	1.89	a
T12	EB	<i>Bacillus</i> sp. 1×10^6	1.89	a
T18	CM	<i>Bacillus</i> sp. 1×10^4	1.61	a
T20	CM	<i>Bacillus</i> sp. 1×10^8	1.60	a
T23	TA	<i>Pseudomonas</i> sp. 1×10^6	1.49	a
T13	EB	<i>Bacillus</i> sp. 1×10^8	1.43	a
T3	HL	<i>Pseudomonas</i> sp. 1×10^8	1.37	a
T19	CM	<i>Bacillus</i> sp. 1×10^6	1.36	a
T15	CM	<i>Pseudomonas</i> sp. 1×10^4	1.26	a
T16	CM	<i>Pseudomonas</i> sp. 1×10^6	1.26	a
T14	EB	Control	1.24	a
T17	CM	<i>Pseudomonas</i> sp. 1×10^8	1.24	a
T9	EB	<i>Pseudomonas</i> sp. 1×10^6	1.18	a
T1	HL	<i>Pseudomonas</i> sp. 1×10^4	1.15	a
T4	HL	<i>Bacillus</i> sp. 1×10^4	1.12	a
T21	CM	Control	1.08	a

Tratamiento	Sustrato	PGPR	Media	Grupo
T25	TA	<i>Bacillus</i> sp. 1×10^4	1.06	a
T8	EB	<i>Pseudomonas</i> sp. 1×10^4	1.03	a
T11	EB	<i>Bacillus</i> sp. 1×10^4	1.02	a
T2	HL	<i>Pseudomonas</i> sp. 1×10^6	1.02	a
T27	TA	<i>Bacillus</i> sp. 1×10^8	1.00	a
T26	TA	<i>Bacillus</i> sp. 1×10^6	0.99	a
T6	HL	<i>Bacillus</i> sp. 1×10^8	0.99	a
T24	TA	<i>Pseudomonas</i> sp. 1×10^8	0.98	a
T7	HL	Control	0.98	a
T5	HL	<i>Bacillus</i> sp. 1×10^6	0.78	a
T28	TA	Control	0.67	a

Fuente: Elaboración propia, 2025.

La comparación de medias de las combinaciones PGPR $\times$ sustrato para el número de brotes a los 90 días no evidenció diferencias significativas entre tratamientos ($p > 0.05$), ya que todos pertenecieron al mismo grupo estadístico a. No obstante, descriptivamente, los tratamientos T10 (EB + *Pseudomonas* sp. 1×10^8) y T12 (EB + *Bacillus* sp. 1×10^6) registraron las mayores medias, con 1.89 brotes, seguidos por T18 (CM + *Bacillus* sp. 1×10^4) con 1.61 brotes y T20 (CM + *Bacillus* sp. 1×10^8) con 1.60 brotes. Por el contrario, el menor promedio correspondió al tratamiento T28 (TA + Control) con 0.67 brotes. Estos resultados indican que, aunque algunas combinaciones presentaron mayores valores promedio, dichas diferencias no fueron suficientes para establecer diferencias estadísticas entre tratamientos.

El número de brotes no presentó diferencias significativas entre los tratamientos durante los 30, 60 y 90 días de evaluación. Este comportamiento sugiere que la emisión de brotes en los esquejes de *Polylepis* sp. dependió principalmente de las reservas fisiológicas contenidas en el material vegetal y del estado de las yemas preexistentes, más que del efecto del sustrato o de la inoculación con PGPR. Hartmann

et al. (2011) indican que, durante las primeras etapas de la propagación por esquejes, el crecimiento inicial de los brotes es sustentado principalmente por las reservas de carbohidratos y nutrientes acumuladas en el tejido antes de que el nuevo sistema radical alcance un funcionamiento pleno.

Asimismo, la ausencia de diferencias significativas puede explicarse porque, en especies leñosas como *Polylepis* la brotación inicial constituye un mecanismo fisiológico regulado principalmente por la viabilidad de las yemas axilares y por el equilibrio hormonal interno del esqueje, antes que por factores externos. Taiz et al. (2015) señalan que la emisión de brotes depende de la interacción entre auxinas, citocininas y otros reguladores del crecimiento, cuya respuesta se condiciona por el estado fisiológico del material vegetal.

Resultados similares han sido reportados en otras especies forestales propagadas vegetativamente. Trueman et al. (2018) mencionan que la emisión de brotes suele presentar una baja variabilidad entre tratamientos durante las primeras fases del establecimiento, debido a que el esqueje prioriza inicialmente la formación de raíces y el restablecimiento del equilibrio hídrico antes de incrementar el crecimiento aéreo. Este comportamiento coincide con lo observado en la presente investigación, donde el número de brotes permaneció relativamente estable mientras otras variables, como el número de folíolos, mostraron un incremento progresivo conforme avanzó el proceso de establecimiento.

Al comparar estos resultados con estudios realizados en el género *Polylepis*, Mamani (2025), en *Polylepis incana*, registró un máximo de 1.81 brotes por planta con la aplicación de ROOT-HOR en combinación con Agrocimax. De manera similar, Quispe (2021) reportó valores de 2.75, 2.50 y 1.55 brotes por esqueje en tratamientos con enraizantes naturales y químicos en *Polylepis incana*, evidenciando que la emisión de brotes puede mantenerse en rangos moderados bajo diferentes estrategias de propagación para este género.

En resumen, los resultados obtenidos permiten aceptar la hipótesis alternativa (H_1), al evidenciar que los sustratos enriquecidos con cepas de rizobacterias influyeron en algunas variables del enraizamiento y desarrollo vegetativo de los esquejes de *Polylepis* sp. El tipo de sustrato presentó un efecto significativo sobre el porcentaje de enraizamiento, la longitud de raíz, el incremento de altura y el número de folíolos. Las PGPR presentaron un efecto significativo sobre la longitud de raíz y sobre el número de folíolos destacando *Bacillus* sp. a 1×10^8 UFC/mL. Asimismo, la interacción sustrato×PGPR fue significativa para el incremento de altura. Por el contrario, el número de brotes no presentó diferencias significativas. En conjunto, los resultados muestran que el sustrato tuvo una influencia importante sobre el establecimiento y desarrollo vegetativo de los esquejes, mientras que el efecto de las PGPR varió según la variable evaluada.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

Se logró aislar e identificar de manera adecuada dos cepas nativas de rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal asociadas a los bosques andinos de *Polylepis* de la localidad de Palca, Puno, correspondientes a *Bacillus* sp. (BcA) y *Pseudomonas* sp. (PsB) las cuales presentaron características funcionales relevantes como la producción de auxinas, solubilización de fósforo y capacidad de crecimiento en condiciones de nitrógeno reducido, evidenciando que los suelos altoandinos constituyen una fuente importante de microorganismos con potencial aplicación en procesos de restauración ecológica.

Se logró enriquecer los sustratos con las cepas nativas de *Bacillus* sp. y *Pseudomonas* sp. en concentraciones de 1×10^4 , 1×10^6 y 1×10^8 UFC/mL, obteniéndose 28 tratamientos experimentales. Los análisis físicoquímicos evidenciaron que los sustratos presentaron condiciones adecuadas de pH, materia orgánica y disponibilidad de nutrientes. Los sustratos orgánicos, especialmente el compost de materia orgánica y el estiércol bovino, ofrecieron condiciones favorables para la inoculación de las cepas y su posterior evaluación en la propagación vegetativa de *Polylepis* sp.

Se concluye que los sustratos y las rizobacterias evaluadas presentaron respuestas diferenciadas en el enraizamiento y desarrollo vegetativo de los esquejes de *Polylepis* sp. El sustrato presentó un efecto significativo sobre el porcentaje de enraizamiento, la longitud de raíz, el incremento de altura y el número de folíolos. Entre las PGPR, *Bacillus* sp. a 1×10^8 UFC/mL mostró la respuesta más favorable sobre la longitud de raíz. La combinación T20 (CM + *Bacillus* sp. a 1×10^8 UFC/mL) alcanzó los mayores valores de enraizamiento (62.5 %) y longitud radicular (23.40 cm), mientras que T10 (EB + *Pseudomonas* sp. a 1×10^8 UFC/mL) presentó el mayor número de folíolos a los 90 días (24.25) y el mayor incremento de altura (5.40 cm). Por último, el número de brotes no presentó diferencias significativas entre los tratamientos evaluados.

5.2. Recomendaciones

Se recomienda ampliar el aislamiento y la caracterización de cepas nativas de rizobacterias, incorporando análisis moleculares de las cepas identificadas y extendiendo el muestreo a otros bosques de *Polylepis*. Asimismo, se recomienda evaluar mecanismos adicionales de promoción del crecimiento vegetal, como la fijación de nitrógeno, la producción de sideróforos y la tolerancia al estrés, con el propósito de ampliar el conocimiento y promover el aprovechamiento de cepas nativas con potencial biotecnológico.

Se sugiere optimizar los protocolos de enriquecimiento de sustratos, estandarizando la concentración, el volumen y la frecuencia de aplicación de los inoculantes, asegurando así una colonización homogénea y persistente. Es recomendable implementar ensayos de viabilidad bacteriana y la dinámica poblacional de las cepas inoculadas mediante recuentos microbiológicos periódicos o herramientas moleculares para verificar la permanencia del inoculante en las fases iniciales del enraizamiento.

Se recomienda evaluar la respuesta en condiciones de campo, comparando la supervivencia y el crecimiento a largo plazo. También sería pertinente probar mezclas de cepas (*Bacillus* + *Pseudomonas*) para explorar posibles efectos sinérgicos. Asimismo, se sugiere replicar el estudio en otras especies nativas altoandinas para ampliar la aplicabilidad de esta biotecnología en programas de restauración ecológica. Finalmente, se sugiere realizar una evaluación económica del uso de PGPR como alternativa para la producción de plantones de *Polylepis* sp., considerando los costos de preparación del inóculo y la posible adquisición de formulaciones comerciales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahemad, M., & Kibret, M. (2014). Mechanisms and applications of plant growth promoting rhizobacteria: Current perspective. *Journal of King Saud University - Science*, 26(1), 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2013.05.001>
- Akhtar, A., Hisamuddin, Robab, M. I., Abbasi, & Sharf, R. (2012). Plant growth promoting rhizobacteria: An overview. *Journal of Natural Product and Plant Resources*, 2(1), 19–31. <https://www.scholarsresearchlibrary.com/abstract/plant-growth-promoting-rhizobacteria-an-overview-4798.html>
- Aldaz, L. J., & Ochoa Luzuriaga, I. L. (2011). *Propagación asexual de diez especies forestales y arbustivas en el Jardín Botánico “Reinaldo Espinosa”* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Loja]. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional de Loja. <https://dspace.unl.edu.ec/jspui/handle/123456789/5348>
- Alvarado, J. C., & Gutiérrez Araujo, M. K. (2020). Aislamiento y selección de rizobacterias solubilizadoras de fósforo a partir de cultivos de *Theobroma cacao* L. *Revista Científica Dékamu Agropec*, 1(1), 15–20. <https://doi.org/10.55996/dekamuagropec.v1i1.21>
- Alzate, M. Y., Fattorini, R., Cesco, S., & Pii, Y. (2024). Plant-microbe interactions in the rhizosphere for smarter and more sustainable crop fertilization: The case of PGPR-based biofertilizers. *Frontiers in Microbiology*, 15, 1440978. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1440978>
- Angulo, V. C., Sanfuentes, E. A., Rodríguez, F., & Sossa, K. E. (2014). Caracterización de rizobacterias promotoras de crecimiento en plántulas de *Eucalyptus nitens*. *Revista Argentina de Microbiología*, 46(4), 338–347. [https://doi.org/10.1016/S0325-7541\(14\)70093-8](https://doi.org/10.1016/S0325-7541(14)70093-8)
- Arcos, J. H. (2017). *Rizobacterias promotoras de crecimiento de plantas para mejorar la productividad en papa* [Tesis doctoral, Universidad Nacional Agraria La Molina]. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional Agraria La Molina. <https://hdl.handle.net/20.500.12996/3078>
- Atik, A. (2014). Effect of different concentrations of vermicompost (Biohumus) on the root collar diameter and height growth in the seedlings of Anatolian black pine. *Journal of Forests*, 1(2), 29–36. <https://archive.conscientiabeam.com/index.php/101/article/view/169>

- Atzori, G., Pane, C., Zaccardelli, M., Cacini, S., & Massa, D. (2021). The role of peat-free organic substrates in the sustainable management of soilless cultivations. *Agronomy*, 11(6), 1236. <https://doi.org/10.3390/agronomy11061236>
- Backer, R., Rokem, J. S., Ilangumaran, G., Lamont, J., Praslickova, D., Ricci, E., Subramanian, S., & Smith, D. L. (2018). Plant growth-promoting rhizobacteria: Context, mechanisms of action, and roadmap to commercialization of biostimulants for sustainable agriculture. *Frontiers in Plant Science*, 9, 1473. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01473>
- Bendezú, D. (2025). *Efecto de dosis de ROOT-HOR en la propagación vegetativa de “Queñua” Polylepis racemosa (R&P), vivero Carampa, Alcamenca, Huancapi, 2023* [Tesis de grado, Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga]. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga. <https://repositorio.unsch.edu.pe/handle/20.500.14612/8035>
- Beneduzi, A., Ambrosini, A., & Passaglia, L. M. P. (2012). Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): Their potential as antagonists and biocontrol agents. *Genetics and Molecular Biology*, 35(4, Suppl.), 1044–1051. <https://doi.org/10.1590/s1415-47572012000600020>
- Biemond, H., Vos, J., & Struik, P. C. (1995). Effects of nitrogen on leaf appearance and leaf growth in potato (*Solanum tuberosum* L.). *Annals of Botany*, 76(5), 469–477. <https://doi.org/10.1006/anbo.1995.1113>
- Binner, E. (2016). Lessons learned – how to produce quality compost. *Sustainable Sanitation Practice*, 26, 4–15. https://www.susana.org/_resources/documents/default/3-2541-7-1462259931.pdf
- Blouin, M., Barrere, J., Meyer, N., Lartigue, S., Barot, S., & Mathieu, J. (2019). Vermicompost significantly affects plant growth: A meta-analysis. *Agronomy for Sustainable Development*, 39, 34. <https://doi.org/10.1007/s13593-019-0579-x>
- Botelho, G. R., & Mendonça-Hagler, L. C. (2006). Fluorescent pseudomonads associated with the rhizosphere of crops: An overview. *Brazilian Journal of Microbiology*, 37(4), 401–416. <https://doi.org/10.1590/S1517-83822006000400001>
- Boza, T. E., & Kessler, M. (2022). A monograph of the genus *Polylepis* (Rosaceae). *PhytoKeys*, 203, 1–274. <https://doi.org/10.3897/phytokeys.203.83529>
- Brady, N. C., & Weil, R. R. (2017). *The nature and properties of soils* (15th ed.). Pearson. <https://search.worldcat.org/title/The-nature-and-properties-of-soils/oclc/965387174>

- Bric, J. M., Bostock, R. M., & Silverstone, S. E. (1991). Rapid in situ assay for indoleacetic acid production by bacteria immobilized on a nitrocellulose membrane. *Applied and Environmental Microbiology*, 57(2), 535–538. <https://doi.org/10.1128/AEM.57.2.535-538.1991>
- Bunt, A. C. (2012). *Media and mixes for container-grown plants: A manual on the preparation and use of growing media for pot plants*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-94-011-7904-1>
- Ccallo, D. M. (2024). *Aplicación de enraizadores comerciales en el crecimiento inicial de qewña (Polylepis incana Kunth) en platabandas, vivero Kulliyoc-K'ayra-San Jerónimo-Cusco* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco]. Repositorio Institucional UNSAAC. <https://repositorio.unsaac.edu.pe/handle/20.500.12918/8355>
- Cedeño, J. D. (2023). *Tratamientos pregerminativos y sustratos para la propagación sexual de guayacán (Guaiacum officinale)* [Tesis de pregrado, Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí]. Repositorio Institucional de la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí. <https://repositorio.uleam.edu.ec/handle/123456789/4626>
- Cerrón, A., Venelli-Pyles, M., Enríquez-Pinedo, L., Taype-Gomez, J., Ccopi-Trucios, D., Zarate-Quñones, R., Flores-Torres, I., Camargo-Hinostroza, S., & Ortega-Quispe, K. (2025). Influence of microclimate, ground cover, and canopy openness on the regeneration of *Polylepis* in the Peruvian Andes. *Environment and Ecology Research*, 13(4), 472–483. <https://doi.org/10.13189/eer.2025.130402>
- Chaiya, L., Gavinlertvatana, P., Teaumroong, N., Pathom-Aree, W., Chaiyasen, A., Sungthong, R., & Lumyong, S. (2021). Enhancing teak (*Tectona grandis*) seedling growth by rhizosphere microbes: A sustainable way to optimize agroforestry. *Microorganisms*, 9(9), 1990. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9091990>
- Chanway, C. P. (1997). Inoculation of tree roots with plant growth promoting soil bacteria: An emerging technology for reforestation. *Forest Science*, 43(1), 99–112. <https://doi.org/10.1093/forestscience/43.1.99>
- Chieb, M., & Gachomo, E. W. (2023). The role of plant growth promoting rhizobacteria in plant drought stress responses. *BMC Plant Biology*, 23, 407. <https://doi.org/10.1186/s12870-023-04403-8>
- Cierjacks, A., Salgado, S., Wesche, K., & Hensen, I. (2008). Post-fire population dynamics of two tree species in high-altitude *Polylepis* forests of central Ecuador. *Biotropica*, 40(2), 176–182. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7429.2007.00361.x>

- Cordero, I., Pueyo, J. J., & Rincón, A. (2024). Bio-fertilisation with native plant growth promoting rhizobacteria increases the tolerance of the neotropical legume tree *Caesalpinia spinosa* to water deficit. *Forest Ecology and Management*, 558, 121786. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2024.121786>
- Cuyckens, G. A. E., & Renison, D. (2018). Ecología y conservación de los bosques montanos de *Polylepis*: Una introducción al número especial. *Ecología Austral*, 28(1-bis), 157–162. <https://doi.org/10.25260/EA.18.28.1.1.766>
- Damtew, A., Birhane, E., & Teferi, H. H. (2019). Vermicomposting enhances the growth of *Olea europaea* subsp. *cuspidata* seedlings: Nursery study from Tigray, northern Ethiopia. *Journal of the Drylands*, 9(1), 977–985
- Dominguez, G. M. (2020). *Efecto de los sustratos en la propagación vegetativa por esquejes del quenual (Polylepis incana) en condiciones de vivero en la localidad de Huacrachuco-Marañón-2018* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Hermilio Valdizán]. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional Hermilio Valdizán. <https://hdl.handle.net/20.500.13080/6614>
- Druege, U. (2020). Overcoming physiological bottlenecks of leaf vitality and root development in cuttings: A systemic perspective. *Frontiers in Plant Science*, 11, 907. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00907>
- Du, Y., Cui, B., Zhang, Q., Wang, Z., Sun, J., & Niu, W. (2020). Effects of manure fertilizer on crop yield and soil properties in China: A meta-analysis. *CATENA*, 193, 104617. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104617>
- Environmental Protection Agency. (1996). *Method 3050B: Acid digestion of sediments, sludges, and soils* (Revision 2) [Archivo PDF]. <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-06/documents/epa-3050b.pdf>
- Environmental Protection Agency. (2004). *Method 9045D: Soil and waste pH* (Revision 4) [Archivo PDF]. <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-12/documents/9045d.pdf>
- Environmental Protection Agency. (2007). *Method 7000B: Flame atomic absorption spectrophotometry* (Revision 2) [Archivo PDF]. <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-12/documents/7000b.pdf>
- Etesami, H. (2025). The dual nature of plant growth-promoting bacteria: Benefits, risks, and pathways to sustainable deployment. *Current Research in Microbial Sciences*, 8, 100421. <https://doi.org/10.1016/j.crmicr.2025.100421>

- Feng, Z., Liang, Q., Yao, Q., Bai, Y., & Zhu, H. (2024). The role of the rhizobiome recruited by root exudates in plant disease resistance: Current status and future directions. *Environmental Microbiome*, 19, 91. <https://doi.org/10.1186/s40793-024-00638-6>
- Fiúza, D. A. F., Vitorino, L. C., Souchie, E. L., Neto, M. R., Bessa, L. A., Silva, C. F., & Trombeta, N. T. (2022). Effect of rhizobacteria inoculation via soil and seeds on *Glycine max* L. plants grown on soils with different cropping history. *Microorganisms*, 10(4), 691. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10040691>
- Fjeldsø, J. (2002). Polylepis forests—Vestiges of a vanishing ecosystem in the Andes. *Ecotropica*, (8), 111–123. https://www.socetropecol.eu/publications/pdf/8-2/Fjeldsa_J_2002_Ecotropica8_111-123.pdf
- Fjeldsø, J., & Kessler, M. (1996). *Conserving the biological diversity of Polylepis woodlands of the highlands of Peru and Bolivia: A contribution to sustainable natural resource management in the Andes*. NORDECO. <https://search.worldcat.org/oclc/610706399>
- Font, C. (2019). Methods for the treatment of cattle manure—A review. *C*, 5(2), 27. <https://doi.org/10.3390/c5020027>
- Gil, J. E., Baca-Flores, J. A., & Álvarez-Moscoso, M. E. (2021). Consumo de leña y valor calorífico de especies en la cordillera del Vilcanota. *Q'Euña*, 11(1), 41–58. <https://revistas.unsaac.edu.pe/index.php/RQ/article/view/431>
- Glick, B. R. (1995). The enhancement of plant growth by free-living bacteria. *Canadian Journal of Microbiology*, 41(2), 109–117. <https://doi.org/10.1139/m95-015>
- Glick, B. R. (2012). Plant growth-promoting bacteria: Mechanisms and applications. *Scientifica*, 2012, 1–15. <https://doi.org/10.6064/2012/963401>
- González-Romero, A. C., Cazares-Silva, M. del R., Cordovez-Martínez, M. del C., Ramos-Campi, Y. C., & Quillén-Ferraro, M. L. (2022). Bacterias aisladas en productos agrícolas provenientes de la cuenca del río Guano. *Kasmera*, 50, e5037965. <https://doi.org/10.56903/kasmera.5037965>
- González, L. C., Araujo, E. F., Wendling, I., Grossi, F., & Xavier, A. (2016). Plant growth-promoting rhizobacteria on rooting of mini-cuttings of *Eucalyptus clones*. *Revista Árvore*, 40(4), 589–598. <https://doi.org/10.1590/0100-67622016000400003>
- González, P., Sossa, K., Rodríguez, F., & Sanfuentes, E. (2018). Rhizobacteria strains as promoters of rooting in hybrids of *Eucalyptus nitens* × *Eucalyptus globulus*. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 78(1), 3–12. <https://doi.org/10.4067/S0718-58392018000100003>

- Gordillo, M. G., Cohen, A. C., Colombo, F., & González, C. V. (2025). The native dryland PGPR *Pseudomonas* 42P4 promotes adventitious rooting in woody cuttings of *Vitis* spp. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*, 57(2), 13–26. <https://doi.org/10.48162/rev.39.167>
- Gruda, N. S. (2019). Increasing sustainability of growing media constituents and stand-alone substrates in soilless culture systems. *Agronomy*, 9(6), 298. <https://doi.org/10.3390/agronomy9060298>
- Guadalupe, G. M. (2026). *Variación de las características del suelo entre pradera altoandina y plantaciones de Pinus radiata y Polylepis sp., comunidad Casa Blanca* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria La Molina]. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional Agraria La Molina. <https://repositorio.lamolina.edu.pe/items/5ae063a2-7368-45a0-9adb-0a637e225584>
- Gupta, S., Kulkarni, M. G., White, J. F., Stirk, W. A., Papenfus, H. B., Doležal, K., Ördög, V., Norrie, J., Critchley, A. T., & Van Staden, J. (2021). Categories of various plant biostimulants – mode of application and shelf-life. In S. Gupta & J. Van Staden (Eds.), *Biostimulants for crops from seed germination to plant development* (pp. 1–60). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823048-0.00018-6>
- Haase, D. L., Bouzza, K., Emerton, L., Friday, J. B., Lieberg, B., Aldrete, A., & Davis, A. S. (2021). The high cost of the low-cost polybag system: A review of nursery seedling production systems. *Land*, 10(8), 826. <https://doi.org/10.3390/land10080826>
- Haddad, N. M., Brudvig, L. A., Clobert, J., Davies, K. F., Gonzalez, A., Holt, R. D., Lovejoy, T. E., Sexton, J. O., Austin, M. P., Collins, C. D., Cook, W. M., Damschen, E. I., Ewers, R. M., Foster, B. L., Jenkins, C. N., King, A. J., Laurance, W. F., Levey, D. J., Margules, C. R., Townshend, J. R. (2015). Habitat fragmentation and its lasting impact on Earth's ecosystems. *Science Advances*, 1(2), e1500052. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1500052>
- Harrigan, W. F., & McCance, M. E. (1966). The description of the morphological and cultural characteristics of an organism. En *Laboratory methods in microbiology* (pp. 17–18). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-1-4832-3205-8.50010-6>
- Hartmann, H. T., Kester, D. E., Davies, F. T., & Geneve, R. L. (2011). *Plant propagation: Principles and practices (8th ed., Pearson New International Edition)*. Pearson Education. <https://www.pearson.de/media/muster/ext/9781292034133.pdf>

- Hartney, S. L., Mazurier, S., Girard, M. K., Mehnaz, S., Davis, E. W., Gross, H., Lemanceau, P., & Loper, J. E. (2013). Ferric-pyoverdine recognition by Fpv outer membrane proteins of *Pseudomonas protegens* Pf-5. *Journal of Bacteriology*, 195(4), 765–776. <https://doi.org/10.1128/JB.01639-12>
- Henning, J. A., Weston, D. J., Pelletier, D. A., Timm, C. M., Jawdy, S. S., Classen, A. T., & Schadt, C. W. (2016). *Pseudomonas* spp. induce gene expression changes associated with growth promotion and stress tolerance in *Populus trichocarpa*. *Plant Biology*, 18(3), 460–473. <https://doi.org/10.1111/plb.12425>
- Huamán, J. C. (2018). *Evaluación de bosques de Polylepis incarum (Bitter) M. Kessler & Scvhmidt-Leb. de Nuñoa; para una propuesta del área de conservación regional (ACR), en Puno* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco]. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco. <https://hdl.handle.net/20.500.12918/7387>
- Huarhua, T. (2017). *Propagación vegetativa de esquejes de queñua (Polylepis incana) con la aplicación de dos enraizadores naturales y tres tipos de sustratos en condiciones de vivero Cuajone, Torata-Moquegua* [Tesis de pregrado, Universidad José Carlos Mariátegui]. Repositorio Institucional de la Universidad José Carlos Mariátegui. <https://hdl.handle.net/20.500.12819/186>
- Huasasquiche, L., Moreno, P., & Jiménez, J. (2020). Caracterización y evaluación del potencial PGPR de la microflora asociada al cultivo de tarwi (*Lupinus mutabilis* Sweet). *Ecología Aplicada*, 19(2), 131–140. <https://doi.org/10.21704/rea.v19i2.1557>
- Igiehon, B. C., Babalola, O. O., & Hassen, A. I. (2024). Rhizosphere competence and applications of plant growth-promoting rhizobacteria in food production – A review. *Scientific African*, 23, e02081. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2024.e02081>
- International Organization for Standardization. (1994). *ISO 11265:1994. Soil quality — Determination of the specific electrical conductivity*. <https://www.iso.org/standard/19243.html>
- IUCN Standards and Petitions Committee. (2022). *Guidelines for using the IUCN Red List categories and criteria* (Version 15.1) [Archivo PDF]. <https://www.iucnredlist.org/documents/RedListGuidelines.pdf>
- Jameson, J. S., & Ramsay, P. M. (2007). Changes in high-altitude *Polylepis* forest cover and quality in the Cordillera de Vilcanota, Perú, 1956–2005. *Biological Conservation*, 138(1–2), 38–46. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2007.04.008>

- Khan, M. N., Ullah, B., Razzaq, A., Hayat, K., Shah, S. M., Wahab, S., Kanwal, Wahid, N., Kaplan, A., Iqbal, M., Fahad, S., & Iqbal, M. (2026). Environmental factors affecting soil chemistry and plant nutrient availability. En S. Saud, S. Fahad, D. Wang, & T. Nawaz (Eds.), *Sustainable soil chemistry and plant nutrition* (pp. 331–366). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-40584-6.00003-6>
- Kindtler, N. L., Sheikh, S., Zervas, A., Ellegaard-Jensen, L., Feld, L., Scheel, M., Campuzano Jiménez, F., da Fonseca, R. R., Laursen, K. H., Jacobsen, C. S., & Ekelund, F. (2025). Small sample amounts from rhizosphere of barley maintain microbial community structure and diversity revealed by total RNA sequencing. *Plant Methods*, 21, 79. <https://doi.org/10.1186/s13007-025-01397-2>
- Kotiyal, P. B., & Sharma, S. K. (2024). Alleviating abiotic and biotic stress, enhancing soil fertility, and growth of forest tree species by plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): A review. *Asian Journal of Biology*, 20(7), 1–16. <https://doi.org/10.9734/AJOB/2024/v20i7419>
- Kranz, C. N., Claassen, V. P., & Loheide, S. P. (2023). Influence of compost amendment rate and level of compaction on the hydraulic functioning of soils. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 59(5), 1115–1127. <https://doi.org/10.1111/1752-1688.13119>
- Kumar, V., & Narula, N. (1999). Solubilization of inorganic phosphates and growth emergence of wheat as affected by *Azotobacter chroococcum* mutants. *Biology and Fertility of Soils*, 28(3), 301–305. <https://doi.org/10.1007/s003740050497>
- Kómetter, R. (2011). *Ecosistemas forestales andinos en el Perú: Una visión de las experiencias y perspectivas del manejo forestal* (Serie Investigación y Sistematización N.º 24) [Archivo PDF]. Programa Regional ECOBONA–COSUDE. <https://sinia.minam.gob.pe/sites/default/files/sial-sialpuno/archivos/public/docs/1575.pdf>
- Lara, C., Oviedo, L. E., & Betancur, C. A. (2011). Bacterias nativas con potencial en la producción de ácido indolacético para mejorar los pastos. *Zootecnia Tropical*, 29(2), 187–194. https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0798-72692011000200005
- León, L. H. (2014). Determinación del potencial promotor del crecimiento vegetal de las enterobacterias aisladas de la rizósfera del cultivo de maíz (*Zea mays* L.). *Scientia Agropecuaria*, 5(4), 177–185. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2014.04.02>

- Liu, D., Lian, B., & Dong, H. (2012). Isolation of *Paenibacillus* sp. and evaluation of its potential for enhancing mineral weathering. *Geomicrobiology Journal*, 29(5), 413–421. <https://doi.org/10.1080/01490451.2011.576602>
- Liu, Y., Ge, T., van Groenigen, K. J., Yang, Y., Wang, P., Cheng, K. & Kuzyakov, Y. (2021). A global synthesis of the effects of organic amendments on soil quality and crop productivity. *Journal of Cleaner Production*, 289, 125817. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125817>
- Llanco, M. (2015). *Aislamiento y caracterización de Pseudomonas y Bacillus provenientes de la rizósfera de diferentes variedades de quinoa (Chenopodium quinoa Willd.) y su uso como potenciales promotoras del crecimiento vegetal* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria La Molina]. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional Agraria La Molina. <https://hdl.handle.net/20.500.12996/2690>
- Logan, N. A., & De Vos, P. (2009). *Bacillus*. En P. De Vos, G. M. Garrity, D. Jones, N. R. Krieg, W. Ludwig, F. A. Rainey, K.-H. Schleifer, & W. B. Whitman (Eds.), *Bergey's manual of systematic bacteriology: Volume 3. The Firmicutes* (2nd ed., pp. 21–128). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-68489-5>
- Madigan, M. T., Bender, K. S., Buckley, D. H., Sattley, W. M., & Stahl, D. A. (2021). *Brock biology of microorganisms (16th ed.)*. Pearson.
- Mamani, A. (2025). *Efecto de enraizadores y bioestimulantes en la propagación vegetativa de qewña (Polylepis incana Kunth) en condiciones de K'ayra–San Jerónimo–Cusco* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco]. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco. <https://hdl.handle.net/20.500.12918/12168>
- Marrero, M. A., Agaras, B., Wall, L. G., & Valverde, C. (2015). Enriquecimiento diferencial de *Pseudomonas* spp. en el rizoplaneo de distintas especies cultivadas. *Revista Argentina de Microbiología*, 47(2), 132–137. <https://doi.org/10.1016/j.ram.2015.03.007>
- Memeli, İ., Tüzel, Y., Durdu, T., Tepecik, M., & Gruda, N. S. (2026). Enhancing cucumber production through compost and plant growth promoting rhizobacteria in an unheated soil based greenhouse. *Scientific Reports*, 16, 6742. <https://doi.org/10.1038/s41598-026-36907-2>
- Mohd Zishan, & Manzoor, U. (2022). Promoting crop growth with symbiotic microbes in agro-ecosystems—II. En J. A. Malik (Ed.), *Microbes and microbial biotechnology*

- for green remediation (pp. 135–148). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90452-0.00009-8>
- Montesinos, D. B., Pinto, Á. C., Beltrán, D. F., & Galiano, W. (2015). Vegetación de un bosque de *Polylepis incarum* (Rosaceae) en el distrito de Lampa, Puno, Perú. *Revista Peruana de Biología*, 22(1), 87–96. <https://doi.org/10.15381/rpb.v22i1.11125>
- Moreno Reséndez, A., García Mendoza, V., Reyes Carrillo, J. L., Vásquez Arroyo, J., & Cano Ríos, P. (2018). Rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal: Una alternativa de biofertilización para la agricultura sustentable. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 20(1), 68–83. <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v20n1.73707>
- Moreno, J. C., & Romero, K. T. (2022). *Propagación asexual de Polylepis quadrijuga (Bitter) y presencia de hongos micorrícicos asociados a la rizosfera de la especie en el SFF Guanentá Alto Río Fonce* [Trabajo de grado, Universidad Distrital Francisco José de Caldas]. Repositorio Institucional de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. <https://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/30948>
- Mulluni, D. (2023). *Percepción y participación ambiental en la conservación de los bosques de queñua (Polylepis pallidistigma) ubicados en la provincia de Lampa-Puno* [Tesis de maestría, Pontificia Universidad Católica del Perú]. Repositorio de Tesis de la Pontificia Universidad Católica del Perú. <http://hdl.handle.net/20.500.12404/27312>
- Naik, H., Jakinala, P., Kumar J, S., Babu B, N., Srinivas, M., & Rao Katika, M. (2023). Plant growth promoting rhizobacteria (PGPR): An overview for sustainable agriculture and development. En J. A. Parrray, N. Shameem, D. Egamberdieva, & R. Z. Sayyed (Eds.), *Microbiome research in plants and soil: Rhizobiome* (pp. 95–125). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-16030-1.00017-1>
- Noh Medina, J., Yam-Chimal, C., Borges-Gómez, L., Zúñiga-Aguilar, J. J., & Godoy-Hernández, G. (2014). Aislados bacterianos con potencial biofertilizante para plántulas de tomate. *Terra Latinoamericana*, 32(4), 273–281. <https://terralatinoamericana.org.mx/index.php/terra/article/view/33>
- Nwigwe, C., Fossey, A., & de Smidt, O. (2023). Effects of plant growth promoting rhizospheric bacteria (PGPR) on survival, growth and rooting architecture of *Eucalyptus* hybrid clones. *Forests*, 14(9), 1848. <https://doi.org/10.3390/f14091848>
- Orozco, M. del C., Santoyo, G., & Glick, B. R. (2023). Recent advances in the bacterial phytohormone modulation of plant growth. *Plants*, 12(3), 606. <https://doi.org/10.3390/plants12030606>

- Pacco, F. (2022). *Efecto de extracto de sauce y abonos orgánicos en el prendimiento de esquejes de queuña (Polylepis tomentella Wedd.) en el vivero distrital de Tambobamba-Apurímac* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco]. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco. <http://hdl.handle.net/20.500.12918/6588>
- Palacio, R., Nava-Reyes, B., Sánchez-Galván, H., Quezada-Rivera, J. J., & Sáenz-Mata, J. (2022). Efecto de la inoculación de rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal de tomate en condiciones de casa sombra comercial. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 13(spe28), 231–242. <https://doi.org/10.29312/remexca.v13i28.3278>
- Park, S., Kim, A.-L., Hong, Y.-K., Shin, J.-H., & Joo, S.-H. (2021). A highly efficient auxin-producing bacterial strain and its effect on plant growth. *Journal of Genetic Engineering and Biotechnology*, 19, 179. <https://doi.org/10.1186/s43141-021-00252-w>
- Patten, C. L., & Glick, B. R. (2002). Role of *Pseudomonas putida* indoleacetic acid in development of the host plant root system. *Applied and Environmental Microbiology*, 68(8), 3795–3801. <https://doi.org/10.1128/AEM.68.8.3795-3801.2002>
- Peix, A., Ramírez-Bahena, M. H., & Velázquez, E. (2018). The current status on the taxonomy of *Pseudomonas* revisited: An update. *Infection, Genetics and Evolution*, 57, 106–116. <https://doi.org/10.1016/j.meegid.2017.10.026>
- Pérez, J. C., & Leguizamón, J. E. (1998). Interacciones entre micorrizas nativas, *Pseudomonas* spp. fluorescentes y calcio en el manejo de *Fusarium* spp. en espárragos. *Cenicafé*, 49(3), 211–223. https://www.researchgate.net/publication/363937976_1998_Interacciones_entre_micorrizas_nativas_Pseudomonas_spp_fluorescentes_y_calcio_en_el_manejo_de_Fusarium_spp_en_esparragos_Cenicafe_49_211-223
- Popescu, A., & Doyle, R. J. (1996). The Gram stain after more than a century. *Biotechnic & Histochemistry*, 71(3), 145–151. <https://doi.org/10.3109/10520299609117151>
- Posada, A. M., Mejía Durango, D. P., Polanco-Echeverry, D., & Cardona Arias, J. A. (2021). Rizobacterias promotoras de crecimiento vegetal (PGPR): Una revisión sistemática 1990–2019. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 12(2), 161–178. <https://doi.org/10.22490/21456453.4040>
- Prasad, M., Srinivasan, R., Chaudhary, M., Choudhary, M., & Jat, L. K. (2019). Plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) for sustainable agriculture: Perspectives and

- challenges. In A. K. Singh, A. Kumar, & P. K. Singh (Eds.), *PGPR amelioration in sustainable agriculture* (pp. 129–157). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815879-1.00007-0>
- Quinteros, N., Flores, C., & Williams, D. (2012). Low genetic diversity and fragmentation effects in a wind-pollinated tree, *Polylepis multijuga* Plig. (Rosaceae) in the high Andes. *Conservation Genetics*, 13, 593–603. <https://doi.org/10.1007/s10592-011-0310-1>
- Quispe Callisaya, M. E. (2013). *Propagación vegetativa de esquejes de queñua (Polylepis besseri Hieron) en base a la aplicación de dos enraizadores naturales y tres tipos de sustratos en el vivero de la comunidad de Huancané* [Tesis de grado, Universidad Mayor de San Andrés]. Repositorio Institucional de la Universidad Mayor de San Andrés. <https://repositorio.umsa.bo/handle/123456789/4136>
- Quispe, M. R. (2021). *Propagación vegetativa de esquejes de queñua (Polylepis incana) con aplicación de enraizadores naturales en condiciones de vivero Patan, Haqaira–Apurímac* [Tesis de pregrado, Universidad José Carlos Mariátegui]. Repositorio Institucional de la Universidad José Carlos Mariátegui. <https://hdl.handle.net/20.500.12819/1515>
- Quispe, W. R. (2022). *Modelamiento de los efectos del cambio climático en la distribución potencial de seis especies del género Polylepis en los Andes Peruanos* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Centro del Perú]. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional del Centro del Perú. <https://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/8305>
- Ramos, Y. B. (2024). *Efecto de dosis de micorrizas y sustratos orgánicos en el enraizamiento de esquejes de queñua (Polylepis sp.) en condiciones de ambiente controlado* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Altiplano]. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional del Altiplano. <https://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/21472>
- Ravi Teja, T. V., Varma, S., Johar, V., Singh, V., & Rao, M. V. (2023). Vegetative propagation of sandalwood (*Santalum album* L.): A review. *International Journal of Environment and Climate Change*, 13(8), 412–417. <https://doi.org/10.9734/ijecc/2023/v13i81968>
- Reed, L., & Glick, B. R. (2023). The recent use of plant-growth-promoting bacteria to promote the growth of agricultural food crops. *Agriculture*, 13(5), 1089. <https://doi.org/10.3390/agriculture13051089>

- Reiner, K. (2010). *Catalase test protocol* [Protocolo técnico]. American Society for Microbiology. <https://asm.org/protocols/catalase-test-protocol>
- Renison, D., & Cingolani, A. M. (1998). Experiencias en germinación y reproducción vegetativa aplicadas a la reforestación con *Polylepis australis* (Rosaceae) en las Sierras Grandes de Córdoba, Argentina. *Agriscientia*, 15, 47–53. <https://doi.org/10.31047/1668.298x.v15.n0.2607>
- Renison, D., Hensen, I., & Cingolani, A. M. (2004). Anthropogenic soil degradation affects seed viability in *Polylepis australis* mountain forests of central Argentina. *Forest Ecology and Management*, 196(2–3), 327–333. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.03.025>
- Richardson, A. E., Barea, J. M., McNeill, A. M., & Prigent-Combaret, C. (2009). Acquisition of phosphorus and nitrogen in the rhizosphere and plant growth promotion by microorganisms. *Plant and Soil*, 321, 305–339. <https://doi.org/10.1007/s11104-009-9895-2>
- Rodríguez, D. G. (2024). *Propiedades físico-químicas del suelo bajo plantaciones forestales nativas en áreas degradadas por la minería no metálica - Chongos Alto - Huancayo* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Centro del Perú]. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional del Centro del Perú. <http://hdl.handle.net/20.500.12894/11068>
- Rojas, T. (2010). *Efecto de sustratos enriquecidos con rizobacterias promotoras de crecimiento en plantines de tomate* [Memoria de título, Universidad de Chile]. Repositorio Académico de la Universidad de Chile. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/112408>
- Romaní, S. G. (2020). *Propiedades químicas del suelo con plantaciones de quinuá (Polylepis racemosa R. & P.) y ciprés (Cupressus macrocarpa), en Cullpa Alta, Huancayo, 2017* [Tesis de pregrado, Universidad Continental]. Repositorio Institucional de la Universidad Continental. <https://hdl.handle.net/20.500.12394/8365>
- Romero, J. L. (2021). *Propagación vegetativa de esquejes de queñua (Polylepis incana) con la aplicación de dos enraizadores naturales y tres tipos de sustratos en condiciones de vivero Región Junín* [Trabajo de investigación, Universidad José Carlos Mariátegui]. Repositorio Institucional de la Universidad José Carlos Mariátegui. <https://hdl.handle.net/20.500.12819/1353>

- Román, O. T. (2024). *Exigencias edáficas de Polylepis spp. en el Bosque Nativo La Quinua Pasco - Cerro de Pasco* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Centro del Perú]. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional del Centro del Perú. <http://hdl.handle.net/20.500.12894/12207>
- Romo, M. (2017). Reforestación y restauración para contribuir a reducir el cambio climático. En A. Sabogal (Ed.), *Bosques y cambio climático en el Perú* (pp. 59–73). Pontificia Universidad Católica del Perú, Instituto de Ciencias de la Naturaleza, Territorio y Energías Renovables. <http://repositorio.pucp.edu.pe/index/handle/123456789/134554>
- Rosero, J. C. (2014). *Evaluación de dos fertilizantes de lenta liberación en la propagación asexual del yagual (Polylepis racemosa) en la comunidad San José del Guanto, cantón Quero, Tungurahua* [Trabajo de investigación, Universidad Técnica de Ambato]. <https://repositorio.uta.edu.ec/bitstreams/0b846fb4-99a9-4717-aae1-98feaf213c24/download>
- Ruiz, J. A., Berdúo-Sandoval, J. E., Sacbajá, A., Kalousová, M., Lojka, B., Fernandez, E., Žiarovská, J., & Sanchez-Perez, A. (2021). Eficiencia de solubilización de fósforo de aislados nativos guatemaltecos de *Pseudomonas fluorescens*. *Ciencia, Tecnología y Salud*, 8(2), 184–201. <https://doi.org/10.36829/63CTS.v8i2.923>
- Sahni, S., & Prasad, B. D. (2021). Rapid methods for identification of plant-growth-promoting rhizobacteria. *International Journal of Plant & Soil Science*, 33(15), 12–17. <https://doi.org/10.9734/ijpss/2021/v33i1530506>
- Salazar, H., Cuyckens, G. A. E., & Guzmán, G. F. (2020). Reproducción sexual y agámica de queñoa (*Polylepis tomentella*) in situ y ex situ. *Revista Científica de la Facultad de Ciencias Agrarias*, 13(2). https://www.fca.unju.edu.ar/media/revista_articulo/trabajo3_Salazar_y_otros.pdf
- Salomon, M. V., Bottini, R., & Piccoli, P. N. (2017). Rhizobacteria stimulate growth and improve physiological responses in grapevine (*Vitis vinifera* L.) cuttings. *Plant Growth Regulation*, 81(3), 431–441. <https://doi.org/10.1007/s10725-016-0214-5>
- Seguí, J. M. (2011). *Biología y biotecnología reproductiva de las plantas*. Editorial Universitat Politècnica de València. <https://riunet.upv.es/handle/10251/72437>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales - SEMARNAT. (2002). *Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis* [Norma

- oficial mexicana]. <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/libros2009/DO2280n.pdf>
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú- SENAMHI. (2018). *Manual de observaciones fenológicas* [Archivo PDF]. <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/01401SENA-11.pdf>
- Senesi, N. (1989). Composted materials as organic fertilizers. *Science of the Total Environment*, 81–82, 521–542. [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(89\)90161-7](https://doi.org/10.1016/0048-9697(89)90161-7)
- Sevillano, C. S., & Morales, L. V. (2021). La temperatura y radiación solar explican diferencias en la distribución de dos árboles altoandinos (*Polylepis* spp.) localmente simpátricos en la Cordillera Blanca, Perú. *Neotropical Biodiversity*, 7(1), 327–340. <https://doi.org/10.1080/23766808.2021.1938887>
- Sezen, I., Kaymak, H. Ç., Aytatlı, B., Dönmez, M. F., & Ercişli, S. (2014). Inoculations with plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) stimulate adventitious root formation on semi-hardwood stem cuttings of *Ficus benjamina* L. *Propagation of Ornamental Plants*, 14(4), 152–157. https://www.journal-pop.org/2014_14_4_152-157.html
- Sharma, N., Mahawar, L., Mishra, A., & Albrechtsen, B. R. (2025). Microbial contributions to plant growth and stress tolerance: Mechanisms for sustainable plant production. *Plant Stress*, 17, 100966. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2025.100966>
- Shiralipour, A., McConnell, D. B., & Smith, W. H. (1992). Physical and chemical properties of soils as affected by municipal solid waste compost application. *Biomass and Bioenergy*, 3(3–4), 261–266. [https://doi.org/10.1016/0961-9534\(92\)90030-T](https://doi.org/10.1016/0961-9534(92)90030-T)
- Simon, S., & Petrášek, J. (2011). Why plants need more than one type of auxin. *Plant Science*, 180(3), 454–460. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2010.12.007>
- Simões, D., Gil, J. F. S., da Silva, R. B. G., Munis, R. A., & da Silva, M. R. (2021). Stochastic economic analysis of investment projects in forest restoration involving containerized tree seedlings in Brazil. *Forests*, 12(10), 1381. <https://doi.org/10.3390/f12101381>
- Solórzano, R. A. (2023). *Inoculación de Persea americana con rizobacterias de los géneros Pseudomonas y Bacillus antagonistas de Phytophthora cinnamomi y Lasiodiplodia theobromae* [Tesis doctoral, Universidad Nacional Agraria La Molina]. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional Agraria La Molina. <https://hdl.handle.net/20.500.12996/5814>
- Soto, J. O. (2021). *Taxonomía fenotípica y molecular de bacterias aisladas de nódulos de Clitoria brachystegia Benth., una leguminosa en peligro de extinción* [Tesis

- doctoral, Universidad Nacional Agraria La Molina]. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional Agraria La Molina. <https://hdl.handle.net/20.500.12996/4870>
- Spaepen, S., Vanderleyden, J., & Remans, R. (2007). Indole-3-acetic acid in microbial and microorganism–plant signaling. *FEMS Microbiology Reviews*, 31(4), 425–448. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6976.2007.00072.x>
- Taiz, L., Zeiger, E., Møller, I. M., & Murphy, A. (2015). *Plant physiology and development* (6th ed.). Sinauer Associates. <https://search.worldcat.org/title/plant-physiology-and-development/oclc/900710263>
- Trueman, S. J., Hung, C. D., & Wendling, I. (2018). Tissue culture of *Corymbia* and *Eucalyptus*. *Forests*, 9(2), 84. <https://doi.org/10.3390/f9020084>
- Trujillo, F. I., Labrín-Sotomayor, N. Y., Becerra-Lucio, P. A., Becerra-Lucio, A. A., Martínez-Heredia, J. E., Chávez-Bárceñas, A. T., & Peña-Ramírez, Y. J. (2022). Plant growth and microbiota structural effects of rhizobacteria inoculation on mahogany (*Swietenia macrophylla* King [Meliaceae]) under nursery conditions. *Forests*, 13(10), 1742. <https://doi.org/10.3390/f13101742>
- Valenzuela, S. R. (2014). *Propagación vegetativa del yagual (Polylepis incana Kunth) mediante la aplicación de tres niveles de enraizadores y tres sustratos. Vivero La Magdalena* [Tesis de pregrado, Universidad Técnica del Norte]. Repositorio Digital Universidad Técnica del Norte. <https://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/4325>
- Vega, C., Bermejo-Franco, J. C., & Villegas-Alvarado, G. (2007). Propagación masiva de *Polylepis tomentella* Weddell ssp. *nana* mediante técnicas de cultivo *in vitro*. *Ecología en Bolivia*, 42(2), 102–120. <http://www.scielo.org.bo/pdf/reb/v42n2/v42n2a03.pdf>
- Vejan, P., Abdullah, R., Khadiran, T., Ismail, S., & Nasrulhaq Boyce, A. (2016). Role of plant growth promoting rhizobacteria in agricultural sustainability: A review. *Molecules*, 21(5), 573. <https://doi.org/10.3390/molecules21050573>
- Velarde, L., Vásquez-Romero, I., De Souza-Pacheco, J., Solórzano-Acosta, R., & Sarmiento-Sarmiento, G. (2021). Aislamiento e identificación de potenciales rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal de una planta nativa que crece en condiciones áridas. *Agroindustrial Science*, 11(3), 295–301. <https://doi.org/10.17268/agroind.sci.2021.03.07>

- Velasco, A., Castellanos-Hernández, O., Acevedo-Hernández, G., Aarland, R. C., & Rodríguez-Sahagún, A. (2020). Bacterias rizosféricas con beneficios potenciales en la agricultura. *Terra Latinoamericana*, 38(2), 333–345. <https://doi.org/10.28940/terra.v38i2.470>.
- Vurukonda, S. S. K. P., Vardharajula, S., Shrivastava, M., & SkZ, A. (2016). Enhancement of drought stress tolerance in crops by plant growth promoting rhizobacteria. *Microbiological Research*, 184, 13–24. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2015.12.003>
- Wang, D., Wang, C., Chen, Y., & Xie, Z. (2023). Developing plant-growth-promoting rhizobacteria: A crucial approach for achieving sustainable agriculture. *Agronomy*, 13(7), 1835. <https://doi.org/10.3390/agronomy13071835>
- Wang, M., & Xu, Z. (2026). PGPR-mediated enhancement of soil nutrients, rhizosphere microbial ecology, and plant growth: a review. *npj Biofilms and Microbiomes*, 12, 95. <https://doi.org/10.1038/s41522-026-00966-0>
- Wang, Y., Pei, Y., Wang, X., Dai, X., & Zhu, M. (2024). Antimicrobial metabolites produced by the plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): *Bacillus* and *Pseudomonas*. *Advanced Agrochem*, 3(3), 206–221. <https://doi.org/10.1016/j.aac.2024.07.007>
- Yana Ticona, M. (2021). *Fitohormona enraizante orgánica y química en la propagación vegetativa de esquejes de queñua (Polylepis tomentella Wedd) en el vivero Alto Huenque de la provincia de Chucuito – Región Puno* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Juliaca]. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional de Juliaca. <http://repositorio.unaj.edu.pe:8080/handle/UNAJ/181>
- Zapalowska, A., Matłok, N., Piechowiak, T., Szostek, M., Puchalski, C., & Balawejder, M. (2023). Physiological and morphological implications of using composts with different compositions in the production of cucumber seedlings. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(18), 14400. <https://doi.org/10.3390/ijms241814400>
- Zulueta, R., Hernández-Montiel, L. G., Murillo-Amador, B., Rueda-Puente, E. O., Lara-Capistrán, L., Troyo-Diéguez, E., & Córdoba-Matson, M. V. (2015). Effect of hydropriming and biopriming on seed germination and growth of two Mexican fir tree species in danger of extinction. *Forests*, 6(9), 3109–3122. <https://doi.org/10.3390/f6093109>

ANEXOS

Anexo I. Composición de medios de cultivo

Tabla 35

Composición de Agua peptonada (TM Media)

Reactivo	Cantidades
Peptona	10.0 g/L
Cloruro de sodio (NaCl)	5.0 g/L
pH	7±0.2

Fuente: Información del fabricante TM Media, 2024.

Tabla 36

Composición de Solución Salina

Reactivo	Para 1 Litro
Agua destilada	100mL
Cloruro de sodio (NaCl)	0.85 g
pH	7±0.2

Fuente: Información del fabricante TM Media, 2024.

Tabla 37

Composición de Medio King B (HiMedia®)

Reactivo	Cantidades
Peptona proteosa	20.0 g/L
Fosfato dipotásico de hidrógeno (K ₂ HPO ₄)	1.5 g/L
Sulfato de magnesio (MgSO ₄)	1.5 g/L
Agar	15.0 g/L
pH	7,2 ± 0,2

Fuente: Información del fabricante HiMedia, 2024.

Tabla 38*Composición de Agar nutritivo (Mast Group)*

Reactivo	Cantidades
Peptona	6.0 g/L
Extracto de carne de vaca	1.0 g/L
Extracto de levadura	2.0 g/L
Cloruro de sodio (NaCl)	5.0 g/L
Agar	14.0 g/L
pH	7±0.2

Fuente: Información del fabricante Mast Group, 2024.

Tabla 39*Composición de Caldo Tripticasa de Soya -Tryptone Soya Broth (HiMedia®)*

Reactivo	Cantidades
Triptona	17.0 g/L
Peptona de soja	3.0 g/L
Cloruro de sodio (NaCl)	5.0 g/L
Dextrosa (glucosa)	2.5 g/L
Fosfato dipotásico de hidrógeno (K ₂ HPO ₄)	2.5 g/L
Ph	7±0.2

Fuente: Información del fabricante HiMedia, 2024.

Tabla 40*Composición de Medio Pikovskaya (HiMedia ®)*

Reactivo	Cantidades
Extracto de levadura	0.5 g/L
Dextrosa (Glucosa)	10 g/L
Fosfato de calcio Ca ₃ (PO ₄) ₂	5.0 g/L
Sulfato de amonio (NH ₄) ₂ SO ₄	0.5 g/L
Cloruro de potasio (KCl)	0.2 g/L
Sulfato de magnesio (MgSO ₄)	0.1 g/L
Sulfato de manganeso (MnSO ₄)	0.0001 g/L
Sulfato ferroso (FeSO ₄)	0.0001 g/L
Agar	15.0 g/L

Fuente: Información del fabricante HiMedia, 2024.

Anexo II. Reactivo Salkowski

Tabla 41

Composición del reactivo Salkowski.

Reactivo	Cantidades
FeCl_3 0.5M	7.5 mL
H_2SO_4	150 mL
H_2O (destilada)	250 mL

Fuente: Adaptado de Bric et al. (1991)

Tabla 42

Composición del Reactivo Salkowski preparación para 100 ml

Reactivo	Cantidades
FeCl_3 0.5M	1.84 mL
H_2SO_4	36.80 mL
H_2O (destilada)	61.34 mL

Fuente: Adaptado de Bric et al. (1991)

Preparación de FeCl_3 0.5M sólido para el reactivo Salkowski

En una solución de 50 mL:

$$M = \frac{m}{PM * Vol_{sol}}$$

$$m = M * PM * Vol_{sol} = 0.5 \text{ mol/L} * 162.3 \text{ g/mol} * 0.05 \text{ L} = 4.058 \text{ g}$$

Se peso 4.058g de FeCl_3 y se aforó en 50 mL de agua destilada

Anexo III. Informe de ensayo de laboratorio de suelo



INFORME DE ENSAYO N° 050004-25/AB/ LABSAF - AREQUIPA

I. INFORMACIÓN GENERAL

Cliente : Myriam Gyanela Quispe
 Propietario / Productor : Myriam Gyanela Quispe
 Dirección del cliente : Puno
 Solicitado por : Myriam Gyanela Quispe
 Muestreado por : Cliente
 Número de muestra(s) : 04 muestras
 Producto declarado : Abono
 Presentación de las muestras(s) : Bolsas de plástico
 Referencia del muestreo : Reservado por el Cliente
 Procedencia de muestra(s) : Juliaca
 Fecha(s) de muestreo : 2025-04-03
 Fecha de recepción de muestra(s) : 2025-04-11
 Lugar de ensayo : Laboratorio de Suelos, Aguas y Foliare - LABSAF Arequipa
 Fecha(s) de análisis : 2025-04-11 al 2025-04-28
 Cotización del servicio : 461-25-AQP
 Fecha de emisión : 2025-05-09

II. RESULTADO DE ANÁLISIS

ITEM	1	2	3	4	5	6
Código de Laboratorio	AB005-AQP-25	AB006-AQP-25	AB007-AQP-25	AB008-AQP-25	-	-
Matriz Analizada	Abono	Abono	Abono	Abono	-	-
Fecha de Muestreo	2025-04-03	2025-04-03	2025-04-03	2025-04-03	-	-
Hora de Inicio de Muestreo (h)	08:00	08:00	08:00	08:00	-	-
Condición de la muestra	Conservada	Conservada	Conservada	Conservada	-	-
Código/Identificación de la Muestra por el Cliente	SUSTRATO 0	SUSTRATO 1	SUSTRATO 2	SUSTRATO 3	-	-
Ensayo	Unidad	LC	Resultados			
pH	unid. pH	-	7,1	6,9	7,0	7,2
Conductividad Eléctrica	mS/m	-	9,1	14,6	9,6	24,3
Materia Orgánica	%	-	4,3	5,30	5,3	5,3
Fósforo	mg/kg	-	917,1	949,0	661,9	767,8
Potasio	mg/kg	-	1 450,0	1 550,0	1 460,0	1 640,0
Calcio	mg/kg	-	11 700,0	9 200,0	10 100,0	12 700,0
Magnesio	mg/kg	-	4 900,0	4 800,0	5 100,0	5 200,0
Nitrogeno	mg/kg	-	3 500,0	6 640,0	6 450,0	8 660,0

III. METODOLOGÍA DE ENSAYO

ENSAYO	NORMA DE REFERENCIA
pH	EPA 9045D, Rev. 4, 2004. Soil and waste pH.
Conductividad	ISO 11265:1994 First Edition/Cor1 1996. Soil Quality - Determination of the Specific Electrical Conductivity - Technical Corrigendum 1
Materia Orgánica	Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. Segunda Sección (31 de Diciembre 2002). ítem 7.1.7 AS-07. 2000. Procedimiento de Walkley y Black
Fósforo	Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. Segunda Sección (31 de Diciembre 2002). ítem 7.1.10 AS-010. 2000. Procedimiento de Olsen y colaboradores. Modificado
Potasio	ME1-15 (Basado en la Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. Segunda Sección (31 de Diciembre 2002). ítem 7.1.12, AS-12 // EPA 7000 B. Revision 2, 2007). Validado (modificado y aplicado fuera del alcance)
Calcio	EPA Method 3050B. Revision 2. 1996// EPA Method 7000B. Revision 2. 2007.
Magnesio	EPA Method 3050B. Revision 2. 1996// EPA Method 7000B. Revision 2. 2007.
Nitrogeno	Determinación de Nitrogeno Total por combustión completa (Análisis elemental)

INFORME DE ENSAYO

N° 050004-25/AB/ LABSAF - AREQUIPA

IV. CONSIDERACIONES

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

V. AUTORIZACIÓN DEL INFORME DE ENSAYO

- El presente Informe de ensayo ha sido autorizado por: Responsable del laboratorio del LABSAF Arequipa.



Firmado digitalmente por:
CALLA CORNEJO Nancy
Vanessa FAU 20131385004 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 15/05/2025 08:41:59-0500

Firma
Nombre del personal administrativo que firma
Cargo del personal administrativo

FIN DE INFORME DE ENSAYO

Anexo IV. Constancia de identificación taxonómica de *Polylepis* sp.



JARDÍN BOTÁNICO DE MISSOURI



CONSTANCIA

El que suscribe, deja constancia que las muestras botánicas, enviadas al Herbario Selva Central Oxapampa (HOXA), para su identificación botánica, por la Srta. MYRIAM GYANELA QUISPE CAÑAPATAÑA, corresponden a los nombres científicos siguientes:

Código y/o No. de recolección	Nombre científico de la muestra consignada al código en referencia	Familia	Coordenadas UTM
MG-001	<i>Polylepis triacotandra</i> Bitter	Rosaceae	0377615, 8287057
MG-002	<i>Polylepis triacotandra</i> Bitter	Rosaceae	0377615, 8287057
MG-003	<i>Polylepis triacotandra</i> Bitter	Rosaceae	0329813, 8306544
MG-004	<i>Polylepis triacotandra</i> Bitter	Rosaceae	0329805, 8306558
MG-005	<i>Polylepis triacotandra</i> Bitter	Rosaceae	0329812, 8306417
MG-007	<i>Polylepis triacotandra</i> Bitter	Rosaceae	0329831, 8306292

De acuerdo con la información proporcionada, las muestras fueron recolectadas en el marco del proyecto de investigación de tesis titulado: EFECTO DE SUSTRATOS ENRIQUECIDOS CON CEPAS DE RIZOBACTERIAS PARA LA PROPAGACION VEGETATIVA DE ESQUEJES DE POLYLEPIS SP. EN LA LOCALIDAD DE PALCA, PUNO-2023

Se expide la presente para los fines que considere conveniente.

Oxapampa 29 de mayo 2026


Ing. Rodolfo Vásquez Martínez

Jardín Botánico de Missouri – Perú



Prolongación Bolognesi Mz. E-6, Oxapampa, Pasco. PERÚ. Telf. 51(63)633474
E-mail jbmperu@yahoo.com URL <https://www.jbmperu.org.pe/>

Anexo V. Informe de ensayo de laboratorio de agua - riego



INFORME DE ENSAYO LABSAF ILLPA N° 010002-26NA / AG / ILL

I. INFORMACIÓN GENERAL

Cliente	: Myriam Gyanela Quispe Cañapata/ 73746319
Propietario / Productor	: Cliente
Dirección del cliente	:
Solicitado por	: Myriam Gyanela Quispe Cañapata
Muestreado por	: Cliente
Referencia del muestreo	: Reservado por el cliente
Procedencia de muestra(s) (***)	:
Fecha(s) de muestreo (***)	: 2026-01-07
Fecha de recepción de muestra(s)	: 2026-01-16
Lugar de ensayo	: LABSAF ILLPA
Fecha(s) de análisis	: 2026-01-16
Cotización del servicio	: 004-26-ILL

II. RESULTADO DE ANÁLISIS

ITEM	1	-	-	-	-	-
Código de Laboratorio	AG0002-ILL-26	-	-	-	-	-
Matriz Analizada	Aqua	-	-	-	-	-
Fecha de Muestreo (***)	2026-01-07	-	-	-	-	-
Hora de Inicio de Muestreo (h) (***)	9:27	-	-	-	-	-
Código/Identificación de la Muestra por el Cliente (***)	AR-01	-	-	-	-	-
Ensayo	Unidad	LC	Resultados			
pH	unid. pH	0,10	8,7	-	-	-
Conductividad Eléctrica	uS/cm	0,10	302	-	-	-
Calcio (Ca)	meq/L	-	1,27	-	-	-
Magnesio (Mg)	meq/L	-	0,86	-	-	-
Sodio (Na)	meq/L	-	1,71	-	-	-
Potasio (K)	meq/L	-	0,84	-	-	-
Suma de Cationes (Σ)	meq/L	-	4,68	-	-	-
Carbonatos (CO ₃)	meq/L	-	0,16	-	-	-
Bicarbonatos (HCO ₃)	meq/L	-	0,32	-	-	-
Cloruros (Cl)	meq/L	-	0,60	-	-	-
Nitratos (N-NO ₃)	meq/L	-	0,26	-	-	-
Sulfatos (S-SO ₄)	meq/L	-	2,08	-	-	-
Suma de Aniones (Σ)	meq/L	-	3,42	-	-	-
R.A.S.	-	-	1,66	-	-	-
Sólidos totales disueltos	mg/L	-	189	-	-	-
Dureza	-	-	Semiblanda	-	-	-
Clasificación del agua (Riverside)	-	-	C2S1	-	-	-
Calidad de agua de riego	-	-	Agua de buena calidad apta para el riego	-	-	-



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

LABSAF Illpa
Anexo Rinconada Salcedo s/n. Puno, Provincia y departamento de Puno.

Email: labsafillpa@inia.gob.pe

F-46 / Ver.07
www.inia.gob.pe



Instituto Nacional de Innovación Agraria

INFORME DE ENSAYO

LABSAF ILLPA

N° 010002-26NA / AG / ILL

III. METODOLOGÍA DE ENSAYO

ENSAYO	NORMA DE REFERENCIA
pH	NTP 214.029: 2023 CALIDAD DE AGUA. Determinación de pH en agua. Método electrométrico
Conductividad Eléctrica	Manual de Procedimiento de Análisis de Suelos y Agua con Fines de Riego. Ministerio de Agricultura. Perú. 2017. Ítem 6.4.1.
Aniones (Cl, S-SO ₄ , N-NO ₃ , CO ₃ y HCO ₃)	Manual de Procedimiento de Análisis de Suelos y Agua con Fines de Riego. Ministerio de Agricultura. Perú. 2017. Ítem 6.4.2.
R.A.S, STD, Dureza, Clasificación del agua (Riverside), Calidad de agua de riego.	Methods of analysis for soil, plants and waters. University of California, División of Agricultural Sciences E.U.A. Sexta reimpresión, octubre 1988. 195 p.

IV. CONSIDERACIONES

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

(**) Este dato ha sido proporcionado por el cliente, por lo que el laboratorio no es responsable de dicha información.

V. AUTORIZACIÓN DEL INFORME DE ENSAYO

- El presente Informe de ensayo ha sido autorizado por: Karla Chávez Zea - Responsable del LABSAF - ILLPA



Firmado digitalmente por:
CHAVEZ ZEA Karla Licely
FAU 20131365994 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 26/01/2026 11:34:32-0500

Firma

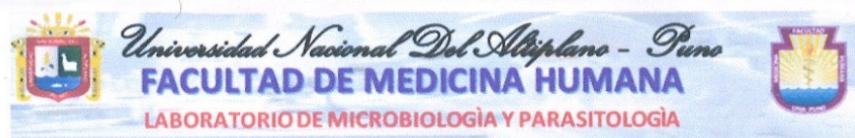
FIN DE INFORME DE ENSAYO



Red de Laboratorios de Suelos, Aguas y Foliare
Acreditado con la Norma
NTP-ISO/IEC 17025:2017
LABSAF Illpa
Anexo Rinconada Salcedo s/n, Puno, Provincia y departamento de
Puno.
Email: labbsafillpa@inia.gob.pe

F-46 / Ver.07
www.inia.gob.pe

Anexo VI. Constancia de uso de laboratorio



CONSTANCIA

EL QUE SUSCRIBE, ENCARGADO DEL LABORATORIO DE MICROBIOLOGIA Y PARASITOLOGIA DE LA FACULTAD DE MEDICINA HUMANA

HACE CONSTAR:

Que, la Señorita: MYRIAM GYANELA QUISPE CAÑAPATAÑA, identificado con DNI. 73746319, de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental y Forestal de la Universidad Nacional de Juliaca, quien ha realizado su Proyecto de Tesis titulado: "EFECTO DE SUSTRATOS ENRIQUECIDOS CON CEPAS DE RIZOBACTERIAS PARA LA PROPAGACION VEGETATIVA DE ESQUEJES DE POLYLEPIS SP. EN LA LOCALIDAD DE PALCA,PUNO" para optar el título profesional de Ingeniera Ambiental y Forestal, realizado en el Laboratorio de Microbiología y Parasitología de esta Facultad, en la fecha de 08 de julio hasta 28 de agosto del 2024.

Se expide la presente a solicitud de los interesados, para los fines que estimen conveniente.

Puno, 19 de setiembre 2024



BALBINO LORGIO PALACIOS FRISANCHO
C.B.P. N° 2125
BIOLOGO

Anexo VII. Autorización para la investigación



SERFOR

Firmado digitalmente por VENTURA
FLORES Elmer Radich FAU
20562836927 soft
Cargo: Administrador Técnico Pfs
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 13.11.2024 11:15:47 -05:00

RESOLUCIÓN ADMINISTRATIVA

Puno, 13 de Noviembre del 2024

RA N° D000157-2024-MIDAGRI-SERFOR-ATFFS-PUNO

VISTO:

El Informe Técnico N° D000040-2024-MIDAGRI-SERFOR-ATFFS-PUNO-YPM de fecha 08 de noviembre de 2024, sobre la evaluación de la solicitud de autorización con fines de investigación de flora fuera de áreas naturales protegidas para especies no categorizadas como amenazadas y no listadas en los apéndices CITES, de investigación de un solo ámbito geográfico regional sin acceso a recursos genéticos o productos derivados, presentada por la administrada MYRIAM GYANELA QUISPE CAÑAPATAÑA identificada con DNI N° 73746319, y,

CONSIDERANDO:

- Que, el artículo 66° de la Constitución Política del Perú, establece que los recursos naturales, renovables y no renovables, son patrimonio de la Nación. El Estado es soberano en su aprovechamiento; asimismo, en su artículo 68° establece que es obligación del Estado promover la conservación de la diversidad biológica;
- Que, la Ley N° 26821, Ley Orgánica para el Aprovechamiento Sostenible de los Recursos Naturales, establece en su artículo 9°, referido a la investigación científica, que el Estado promueve la investigación científica y tecnológica sobre la diversidad, calidad, composición, potencialidad y gestión de los recursos naturales. Asimismo, promueve la información y el conocimiento sobre los recursos naturales. Para estos efectos, podrán otorgarse permisos para investigación en materia de recursos naturales;
- Que, el artículo 13° de la Ley N° 29763, crea el Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre-SERFOR, como organismo público técnico especializado, con personería jurídica de derecho público interno, como pliego presupuestal adscrito al Ministerio de Agricultura y Riego. Asimismo, se señala que el SERFOR es la autoridad nacional forestal y de fauna silvestre, ente rector del Sistema Nacional de Gestión Forestal y de Fauna Silvestre (SINAFOR), y se constituye en su autoridad técnico-normativa a nivel nacional, encargada de dictar las normas y establecer los procedimientos relacionados a su ámbito;
- Que el artículo 137° de la Ley N° 29763, declara de interés nacional la investigación, el desarrollo tecnológico, la mejora del conocimiento y el monitoreo del estado de conservación del patrimonio forestal y de fauna silvestre de la Nación.
- Que, mediante Decreto Supremo N° 007-2013-MINAGRI del 18 de julio del 2013, y modificado por Decreto Supremo N° 016-2014-MINAGRI del 03 de setiembre del 2014, aprobó el Reglamento de Organización y Funciones - ROF del Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre - SERFOR, el mismo que en la parte de disposiciones complementarias transitorias señala que las administraciones técnicas forestales y de fauna silvestre se incorporan al SERFOR, como órganos desconcentrados de actuación local del SERFOR, ejerciendo una de las funciones de las Administraciones Técnicas Forestales y de Fauna Silvestre, la de actuar como primera instancia en la gestión y administración de los recursos forestales y

Esta es una copia auténtica imprimible de un documento electrónico archivado en el Servicio Forestal y de Fauna Silvestre, 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 de la siguiente dirección web: Url: <https://sgd.serfor.gob.pe/validadorDocumental/> Clave: UOORRC



RESOLUCIÓN ADMINISTRATIVA

de fauna silvestre, dentro del ámbito territorial de su competencia; y acorde a las atribuciones reconocidas;

- Que, mediante Resolución de Dirección Ejecutiva N° 060-2016-SERFOR/DE, se aprueba los "Lineamientos para el otorgamiento de la autorización con fines de investigación científica de flora y/o fauna silvestre";
- Que, según lo dispuesto por el artículo 140° de la Ley N° 29763, dispone que La autoridad regional forestal y de fauna silvestre otorga autorizaciones para extracción de recursos forestales y de fauna silvestre con fines de investigación científica.
- Que, mediante Decreto Supremo N° 018-2015-MINAGRI, vigente desde 01 de octubre de 2015, se aprobó el Reglamento para la Gestión Forestal, el mismo que en el artículo 154°, menciona que la investigación científica del Patrimonio se aprueba mediante autorizaciones, salvaguardando los derechos del país, respecto a su patrimonio genético nativo, así mismo, las ARFFS otorgan autorizaciones con fines de investigación científica, que impliquen la utilización de métodos directos e indirectos para especies no categorizadas como amenazadas, no listadas en los apéndices CITES y que en ningún caso otorgue el acceso a los recursos genéticos o sus productos derivados, de acuerdo a los lineamientos aprobados por el SERFOR para la evaluación para las solicitudes, así como los criterios para la verificación del cumplimiento de los compromisos de los investigadores;
- Que, mediante solicitud de fecha 14 de octubre de 2024, la administrada MYRIAM GYANELA QUISPE CAÑAPATAÑA, investigadora, solicita autorización con fines de investigación de flora fuera de áreas naturales protegidas para especies no categorizadas como amenazadas y no listadas en los apéndices CITES, de investigación de un solo ámbito geográfico regional sin acceso a recursos genéticos o productos derivados, para el proyecto denominado: *"Efecto de sustratos enriquecidos con cepas de rizobacterias para la propagación vegetativa de esquejes de Polylepís sp. en la localidad de Palca, Puno"* estando a lo antes indicado y conforme lo prescrito por la norma correspondiente es responsabilidad del investigador contar con los permisos de los titulares de los predios, y autoridades correspondientes a fin de que cuente con el acceso correspondiente a las áreas de estudio, de ser el caso;
- Es de considerar que el estudio será realizado por un periodo de once (11) meses, en el distrito de Palca provincia de Lampa;
- Que, por tanto, la solicitud presentada ha sido evaluada verificando el cumplimiento de los requisitos exigidos en el numeral 9 del Anexo N° 1 del Reglamento para la Gestión del Patrimonio Forestal en concordancia con los "Lineamientos para el otorgamiento de la autorización con fines de investigación científica de flora y/o fauna silvestre", aprobados por Resolución de Dirección Ejecutiva N° 060-2016-SERFOR/DE, siendo estos los siguientes: i) Solicitud con carácter de declaración jurada que contenga información sobre el investigador, según formato; ii) Hoja de vida del investigador principal y plan de investigación, según formato; iii) Carta de presentación de los investigadores participantes, emitida por la institución académica u organización científica nacional o extranjera de procedencia; iv) Documento que acredite el consentimiento informado previo, expedido por la respectiva organización comunal representativa, de corresponder; y v) Documento

Esta es una copia auténtica imprimible de un documento electrónico archivado en el Servicio Forestal y de Fauna Silvestre, 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 de la siguiente dirección web: Url: <https://sgd.serfor.gob.pe/validadorDocumental/> Clave: UO0ORRC



RESOLUCIÓN ADMINISTRATIVA

que acredite el acuerdo entre las instituciones que respaldan a los investigadores nacionales y extranjeros, en caso la solicitud sea presentada por un investigador extranjero. De igual forma se considero los requisitos establecidos en Texto Único de Procedimientos Administrativos – TUPA, aprobados mediante Decreto Supremo N° 012-2024-MIDAGRI.

- Que, el Informe Técnico N° D000040-2024-MIDAGRI-SERFOR-ATFFS-PUNO-YPM de fecha 08 de noviembre de 2024, señala que la solicitud materia de resolución cumple todos los requisitos establecidos en los lineamientos para el otorgamiento de la autorización con fines de investigación de fauna silvestre, aprobado por Resolución de Dirección Ejecutiva N° 060-2016-SERFOR/DE.
- Adicional a ello precisa que la investigación prevé la colecta de ejemplares conforme se describe a continuación;

Familia	Nombre científico	Nombre común	Tipo de muestra (ejemplar entero, hojas, flores, plumas, sangre, etc.)	Cantidad	Finalidad de la colecta o captura temporal (determinación taxonómica, análisis parasitológico, etc.)
Rosaceae	<i>Polylepis sp.</i>	Queñua	Esquejes	100	Propagación vegetativa

- Que, el artículo 158° del Decreto Supremo N° 018-2015-MINAGRI que aprueba el reglamento para la gestión del patrimonio forestal señala que: La autorización para actividades de investigación científica de flora silvestre genera las siguientes obligaciones:
 - a. No extraer especímenes, ni muestras biológicas, de flora silvestre no autorizada; no ceder los mismos a terceras personas, ni utilizarlos para fines distintos a lo autorizado.
 - b. Entregar al SERFOR un informe final en idioma español, incluyendo una versión digital en el mismo idioma, como resultado de la autorización otorgada, así como copia de las publicaciones producto de la investigación realizada, e indicar el número de la Autorización en las publicaciones generadas. Esta información es ingresada al SNIFFS.
 - c. Depositar el material colectado en una institución científica nacional depositaria de material biológico, así como entregar al SERFOR la constancia de dicho depósito. En casos debidamente justificados, y siempre que el material colectado no constituya holotipos ni ejemplares únicos, el depósito se podrá realizar en una institución distinta a la mencionada; para ello se requiere la autorización del SERFOR.
 - d. Incluir a por lo menos un investigador nacional, cuando la autorización de investigación sea requerida por extranjeros.
 - e. Incluir en las publicaciones el reconocimiento correspondiente al investigador nacional que participó en la investigación, en caso la autorización haya sido otorgada a investigadores extranjeros.
- Que, de conformidad a lo dispuesto en la Ley N° 29763, Ley Forestal y de Fauna Silvestre; el Texto Único Ordenado de la Ley N° 27444, Ley del Procedimiento Administrativo General aprobado con Decreto Supremo N° 004-2019-JUS, el Reglamento para la Gestión de Fauna Silvestre, aprobado por Decreto Supremo N° 018-2015-MINAGRI, el Decreto Supremo N° 007-2013- MINAGRI, que aprueba el

Esta es una copia auténtica imprimible de un documento electrónico archivado en el Servicio Forestal y de Fauna Silvestre, 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 de la siguiente dirección web: Url: <https://sgd.serfor.gob.pe/validadorDocumental/> Clave: U000RRC



RESOLUCIÓN ADMINISTRATIVA

Reglamento de Organización y Funciones del Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre - SERFOR, modificado mediante Decreto Supremo N° 016-2014-MINAGRI, en la cual incorpora a las Administraciones Técnicas Forestales y de Fauna Silvestre como Órganos desconcentrados de actuación local del SERFOR;

SE RESUELVE:

Artículo 1°.- Otorgar la autorización con fines de investigación de flora fuera de áreas naturales protegidas para especies no categorizadas como amenazadas y no listadas en los apéndices CITES, de investigación de un solo ámbito geográfico regional sin acceso a recursos genéticos o productos derivados, a la administrada MYRIAM GYANELA QUISPE CAÑAPATAÑA identificada con DNI N° 73746319, para la realización de la investigación científica titulada: *"Efecto de sustratos enriquecidos con cepas de rizobacterias para la propagación vegetativa de esquejes de Polyplepis sp. en la localidad de Palca, Puno"* en la que participará como investigador principal, en virtud de las consideraciones antes expuestas, correspondiéndole el Código de Autorización N° 21-PUN/AUT-IFL-2024-005.

Artículo 2°.- El desarrollo de la investigación científica autorizada se circunscribe en la región de Puno, de acuerdo con las disposiciones establecidas en el Informe Técnico N° D000040-2024-MIDAGRI-SERFOR-ATFFS-PUNO-YPM.

Artículo 3°.- El proyecto *"Efecto de sustratos enriquecidos con cepas de rizobacterias para la propagación vegetativa de esquejes de Polyplepis sp. en la localidad de Palca, Puno"*, será realizado por un periodo de once (11) meses, conforme al plan de investigación participaran los siguientes investigadores.

Apellidos, Nombres	DNI/PASAPORTE	Profesión	Nacionalidad	Relación en la investigación
Myriam Gyanela Quispe Cañapataña	73746319	Egresada en Ingeniería Ambiental y Forestal	Peruana	Investigador Principal

Artículo 4°.- El o la titular de la autorización se encuentra obligado al cumplimiento del plan de investigación, así como el cumplimiento de las obligaciones establecidas en la parte considerativa de la presente resolución así mismo está obligado a:

- Colectar únicamente las muestras autorizadas.
- No ceder el material colectado a terceros, ni utilizarlo para fines distintos a lo autorizado.
- Si por razones científicas acotadas, se requiere enviar al extranjero parte del material colectado, los interesados deberán gestionar el correspondiente Permiso para la Exportación ante la Dirección General de Gestión Sostenible del Patrimonio Forestal y de Fauna Silvestre del SERFOR, así como pasar el control respectivo.
- No contactar, ni ingresar a los territorios comunales sin contar con la autorización de las autoridades comunales correspondientes.
- Entregar a la Administración Técnica Forestal y de Fauna Silvestre de Puno una (01) copia del Informe Parcial anual (incluyendo versión digital), al término de cada año, contado a partir de la emisión de la presente autorización. Asimismo, entregar una (01) copia de las publicaciones producto de la investigación realizada en formato

Esta es una copia auténtica imprimible de un documento electrónico archivado en el Servicio Forestal y de Fauna Silvestre, 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 de la siguiente dirección web: Url: <https://sgd.serfor.gob.pe/validadorDocumental/> Clave: U000RRC



RESOLUCIÓN ADMINISTRATIVA

- impreso y digital.
- f) Entregar a la Administración Técnica Forestal y de Fauna Silvestre de Puno, una (01) copia del Informe Final (incluyendo versión digital) como resultado de la autorización otorgada, copias del material fotográfico y/o slides que puedan ser utilizadas para difusión. Asimismo, entregar una (01) copia de las publicaciones producto de la investigación realizada en formato impreso y digital.
 - g) Los Informes Parciales y Final deberán contener una lista taxonómica de las especies de fauna colectadas o registradas bajo la presente autorización, en formato MS Excel. Ésta lista deberá contar con sus respectivas coordenadas en formato UTM (Datum WGS84), incluyendo la zona (17, 18 ó 19). El formato de Informe Parcial y Final que debe ser usado se encuentra en el Anexo 1 de la presente resolución.
 - h) La entrega de lo indicado en el literal e), no deberá exceder los seis (06) meses luego de terminado cada año de la autorización; y en el caso del literal f) no deberá ser mayor a los seis (06) meses al vencimiento de la presente autorización.
 - i) Indicar el número de la Resolución en las publicaciones generadas a partir de la autorización concedida.
 - j) Solicitar anticipadamente al SERFOR o ARFFS y dentro del plazo de vigencia de la autorización, cualquier cambio en las características del proyecto (p. ej. Cronograma, especialistas, puntos de muestreo, etc.) que demanden la modificación de la presente Resolución.

Artículo 5°.- El investigador deberá tomar las medidas de bioseguridad necesarias durante la captura y/o colecta de flora silvestre.

Artículo 6°.- Los derechos otorgados a través de la presente autorización, no eximen al titular de contar con la autorización respectiva para el ingreso a territorios de comunidades nativas o comunidades campesinas, ANP, predios privados ni a áreas comprendidas en títulos habilitantes, por lo que es responsabilidad de los titulares obtener las citadas autorizaciones.

Artículo 7°.- La Administración Técnica Forestal y de Fauna Silvestre del SERFOR, no se responsabiliza por accidentes o daños sufridos por la o el solicitante de esta autorización, durante la ejecución del proyecto; asimismo, se reserva el derecho de demandar del proyecto de investigación los cambios a que hubiese lugar en los casos en que se formulen ajustes sobre la presente autorización.

Artículo 8°.- Notificar la presente resolución y el Informe Técnico N° D000040-2024-MIDAGRI-SERFOR-ATFFS-PUNO-YPM, a la administrada, para su conocimiento, cumplimiento y fines.

Contra la presente resolución, es posible la interposición de los recursos impugnativos previstos en el TUO de la Ley N° 27444, Ley del Procedimiento Administrativo General, aprobado por Decreto Supremo N° 004-2019-JUS.

Artículo 9°.- Disponer la publicación de la presente Resolución en el Portal Web del Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre: www.serfor.gob.pe.

Esta es una copia auténtica imprimible de un documento electrónico archivado en el Servicio Forestal y de Fauna Silvestre, 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 de la siguiente dirección web: Url: <https://sgd.serfor.gob.pe/validadorDocumental/> Clave: U000RRC



RESOLUCIÓN ADMINISTRATIVA

Regístrese, comuníquese.

Firmado Digitalmente

ELMER RADICH VENTURA FLORES
Administrador Técnico
Forestal y de Fauna Silvestre de Puno
Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre – SERFOR

Esta es una copia auténtica imprimible de un documento electrónico archivado en el Servicio Forestal y de Fauna Silvestre, 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 de la siguiente dirección web: Url: <https://sgd.serfor.gob.pe/validadorDocumental/> Clave: UOOORRC

Anexo VIII. Panel fotográfico

Figura 4

Árbol de Polylepis sp. en el bosque de Antalla, distrito de Palca.



Fuente: Archivo fotográfico propio, 2024.

Figura 5

Vista general del bosque de Polylepis sp. en Antalla en zona altoandina.



Fuente: Archivo fotográfico propio, 2026.

Figura 6

*Muestro de la Rizosfera de *Polylepis* sp. en el bosque de Antalla, distrito de Palca*



Fuente: Archivo fotográfico propio, 2024.

Figura 7

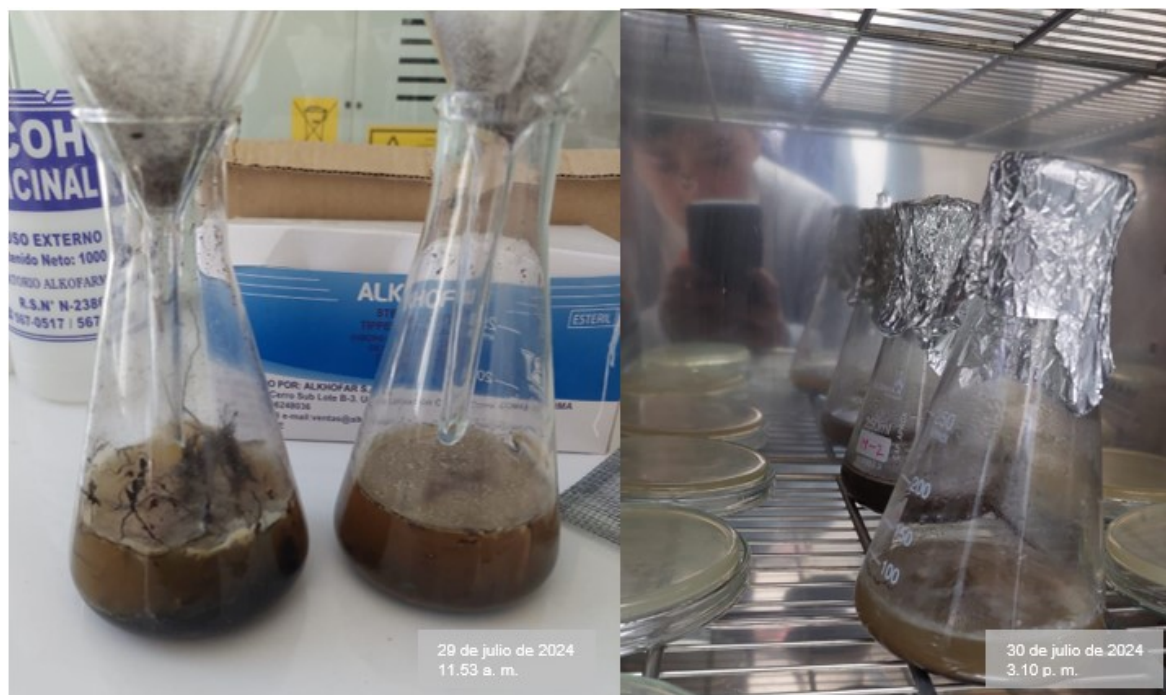
Transporte y almacenamiento de muestras de suelo para análisis microbiológico



Fuente: Archivo fotográfico propio, 2024.

Figura 8

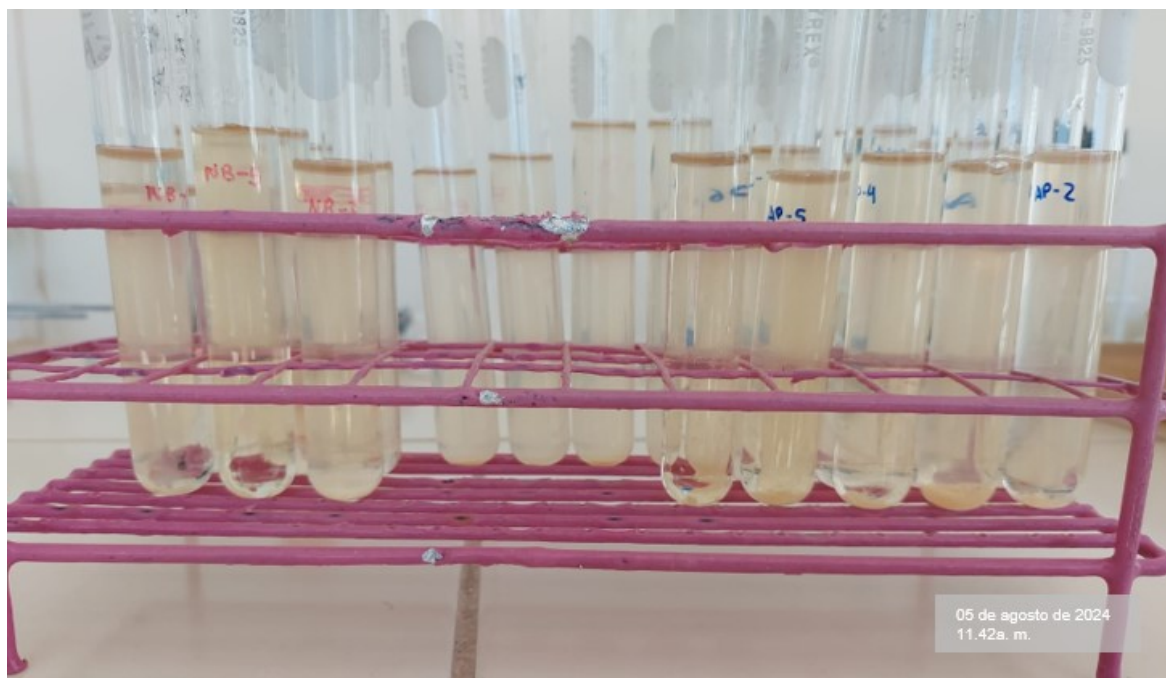
Preparación de muestras de suelo para diluciones seriadas



Fuente: Archivo fotográfico propio, 2024.

Figura 9

Preparación de diluciones seriadas a partir de muestras de suelo rizosférico



Fuente: Archivo fotográfico propio, 2024.

Figura 10

Siembra de diluciones en medio de cultivo



Fuente: Archivo fotográfico propio, 2024.

Figura 11

Distribución del inóculo en placas mediante técnica de extensión superficial



Fuente: Archivo fotográfico propio, 2024.

Figura 12

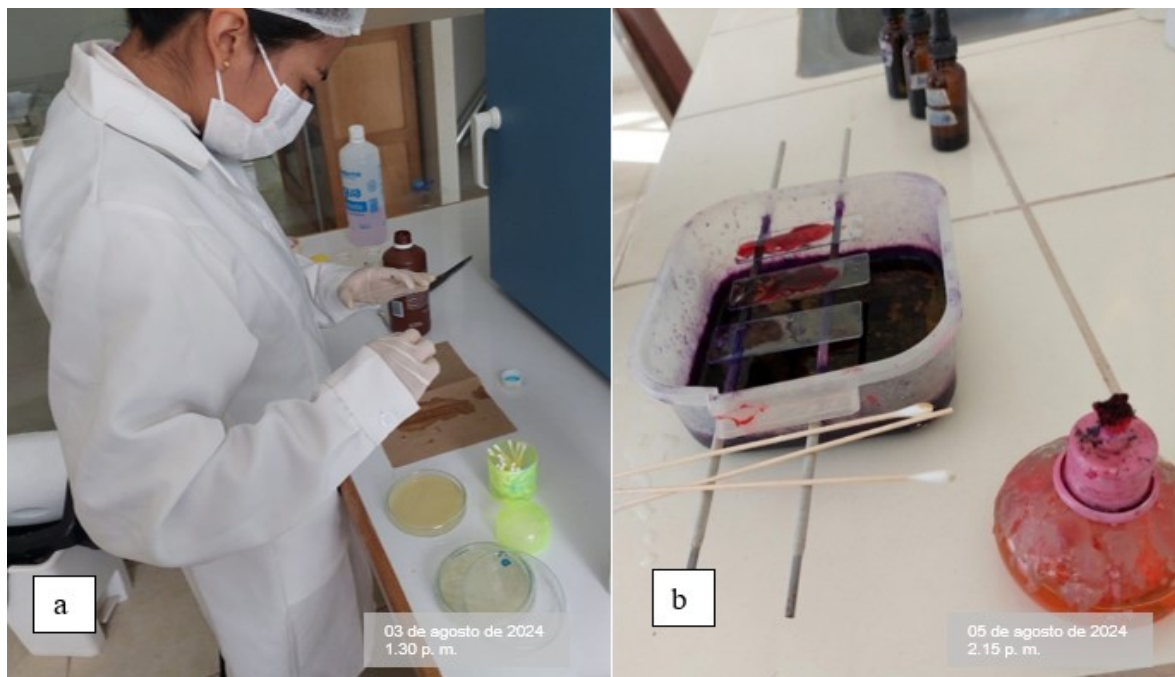
Incubación de placas para el crecimiento de colonias bacterianas



Fuente: Archivo fotográfico propio, 2024.

Figura 13

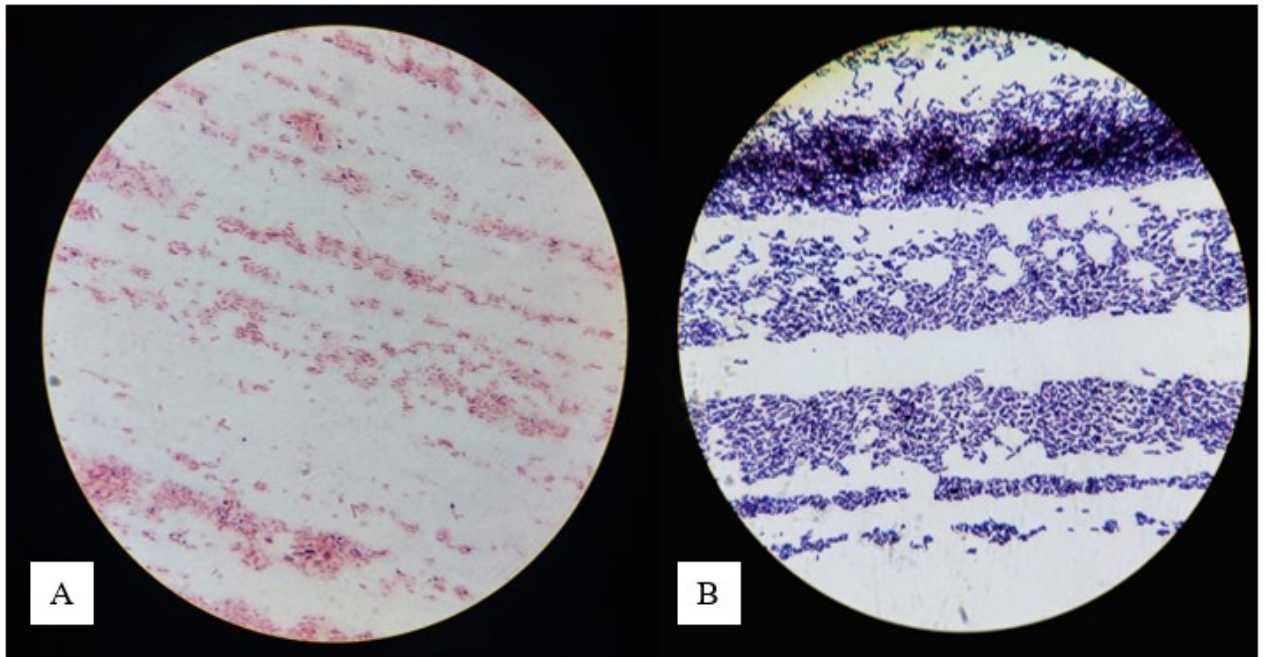
Pruebas de caracterización bacteriana (a) prueba de catalasa. y (b) tinción de Gram



Fuente: Archivo fotográfico propio, 2024.

Figura 14

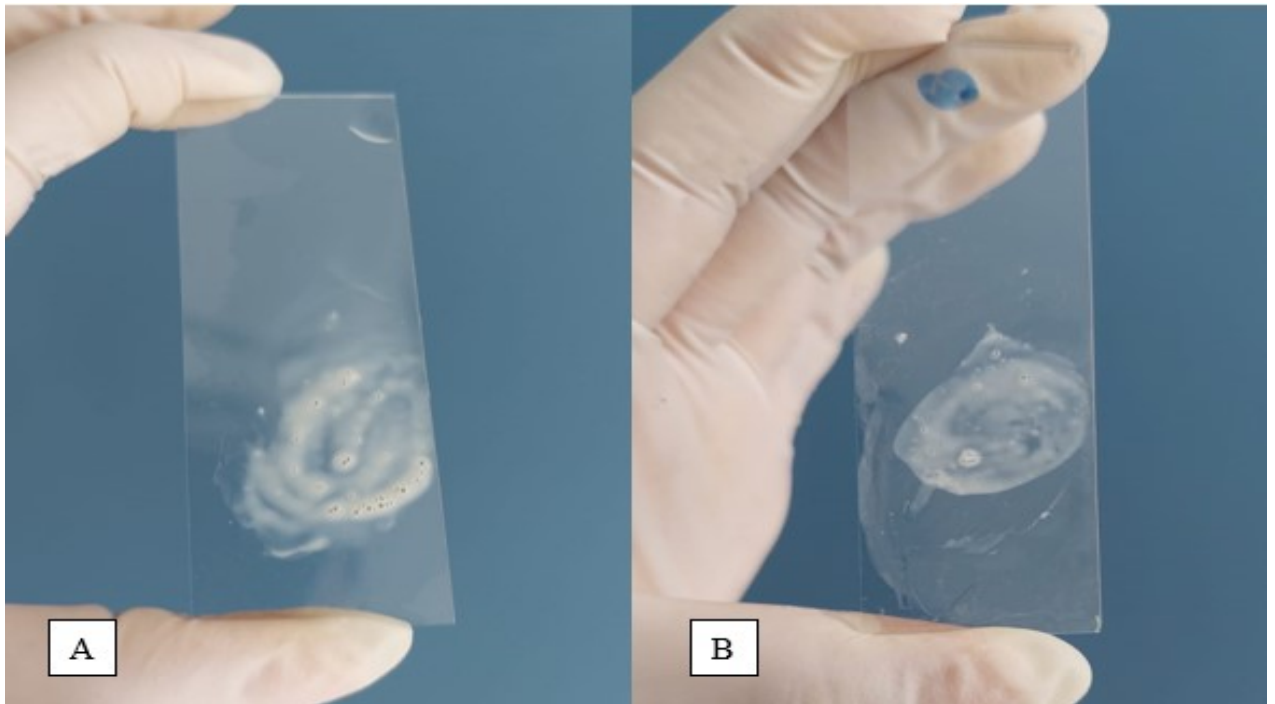
*Identificación de los géneros *Pseudomonas* (A) y *Bacillus* (B) en microscopio óptico con un objetivo de 100 x.*



Fuente: Archivo fotográfico propio, 2024.

Figura 15

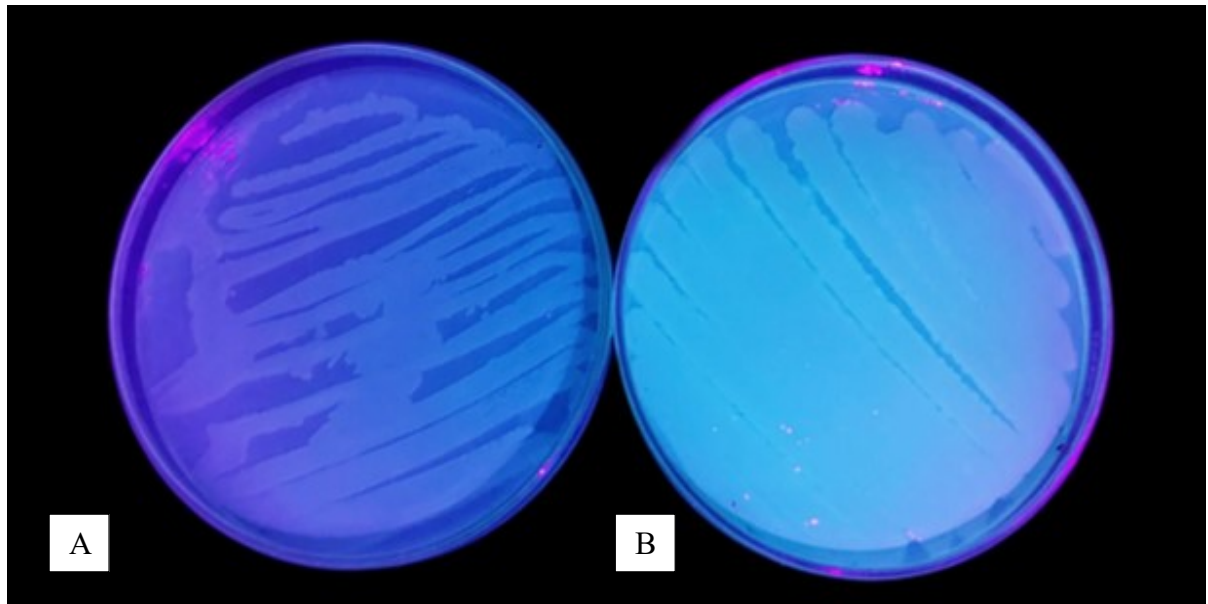
*Prueba bioquímica de catalasa en (A) *Pseudomonas* y (B) *Bacillus**



Fuente: Archivo fotográfico propio, 2024.

Figura 16

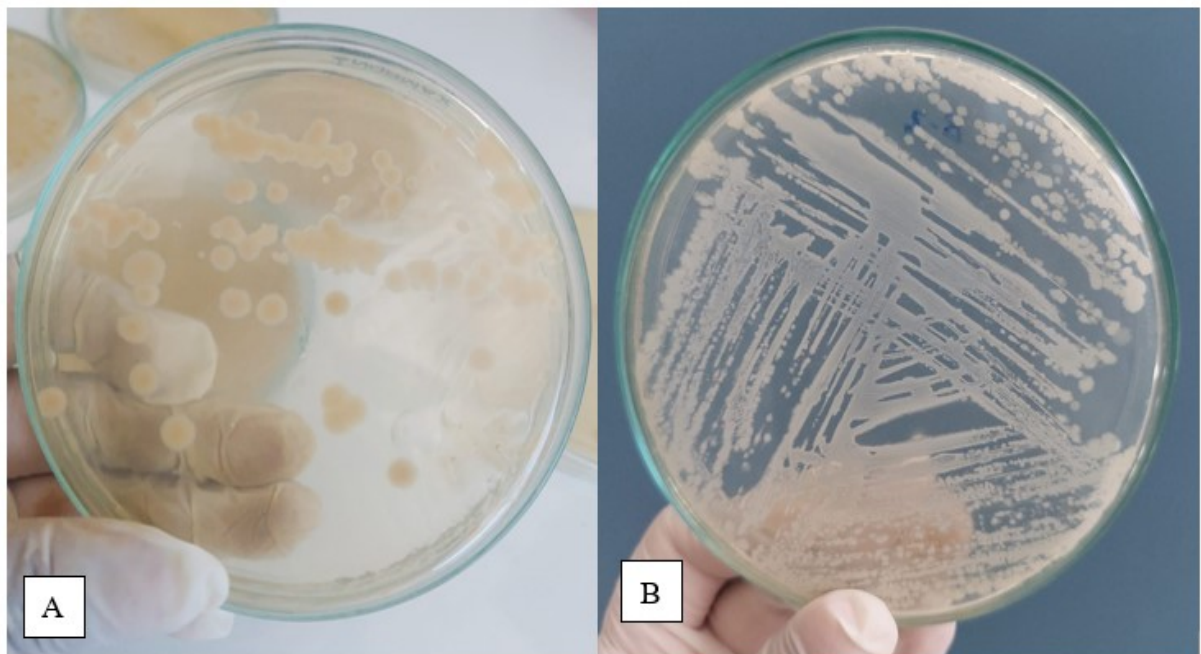
Prueba de fluorescencia en cepas de género Bacillus (A) y Pseudomonas (B)



Fuente: Archivo fotográfico propio, 2024.

Figura 17

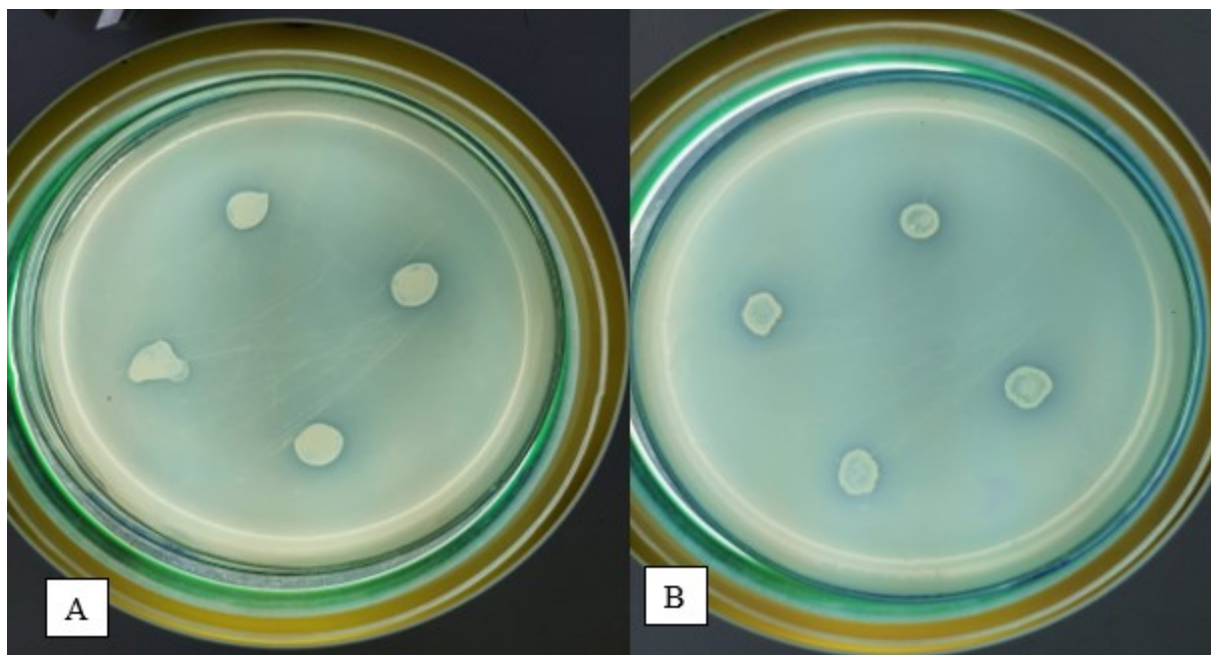
Colonias seleccionadas de Pseudomonas (A) y Bacillus (B), elegidas en función de su compatibilidad morfológica.



Fuente: Archivo fotográfico propio, 2024.

Figura 18

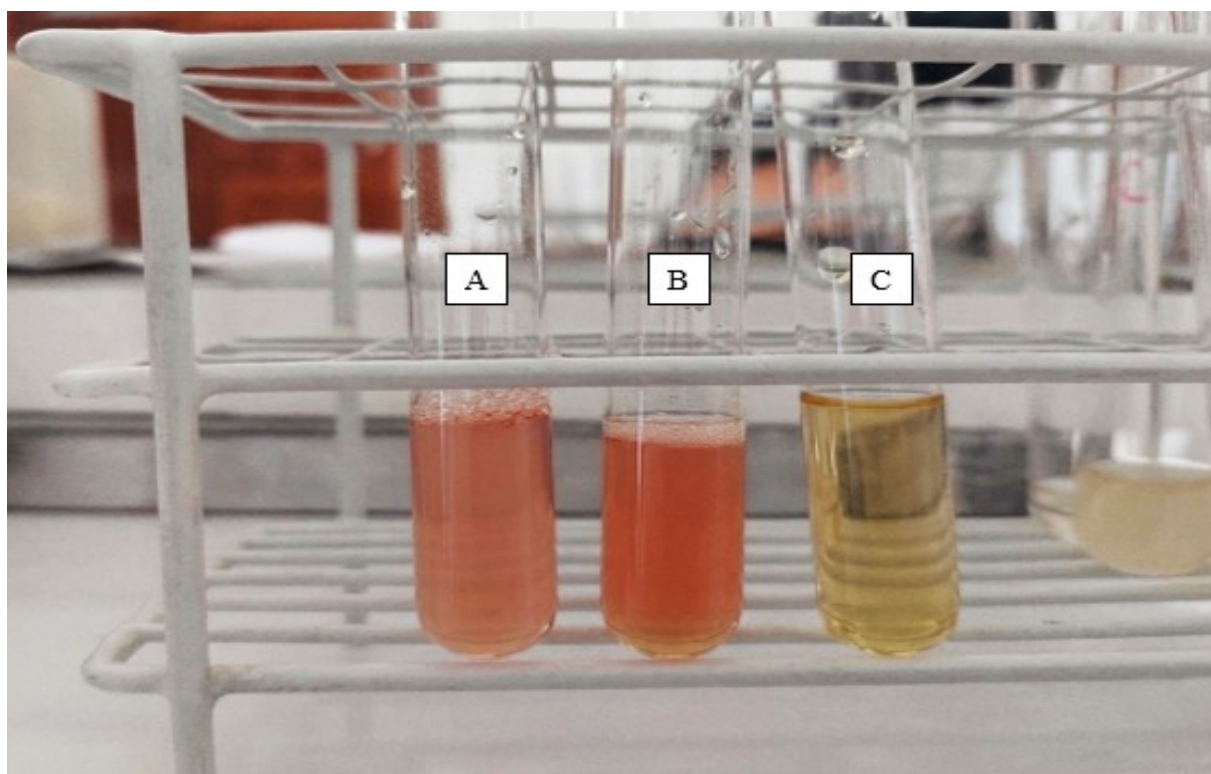
Prueba de solubilización de fosfato en el medio PVK para Pseudomonas (A) y Bacillus (B)



Fuente: Archivo fotográfico propio, 2024.

Figura 19

Reacciones positivas de AIA presentadas por Pseudomonas (A) y Bacillus (B) frente al control (C)



Fuente: Archivo fotográfico propio, 2024.

Figura 20

Suspensiones bacterianas a diferentes concentraciones para su aplicación en la inoculación



Fuente: Archivo fotográfico propio, 2024.

Figura 21

Abonos considerados para la investigación como humus de lombriz (A), compost de materia orgánica (B) y estiércol de bovino tamizado (C).



Fuente: Archivo fotográfico propio, 2024.

Figura 22

Pasteurización de estiércol bovino.



Fuente: Archivo fotográfico propio, 2024.

Figura 23

Preparación de sustratos para el establecimiento de tratamientos



Fuente: Archivo fotográfico propio, 2024.

Figura 24

Recolección de esquejes a partir de ramas de Polylepis sp.



Fuente: Archivo fotográfico propio, 2025.

Figura 25

Esquejes recolectados de Polylepis sp. para propagación vegetativa.



Fuente: Archivo fotográfico propio, 2025.

Figura 26

Inoculación de esquejes y sustratos con rizobacterias (A) inmersión de esquejes en el inóculo bacteriano y (B) aplicación del inóculo en el sustrato.



Fuente: Archivo fotográfico propio, 2025.

Figura 27

*Comparación del desarrollo radicular a los 90 días de esquejes de *Polylepis* sp. inoculados con *Bacillus* sp.*



Fuente: Archivo fotográfico propio, 2025.

Figura 28

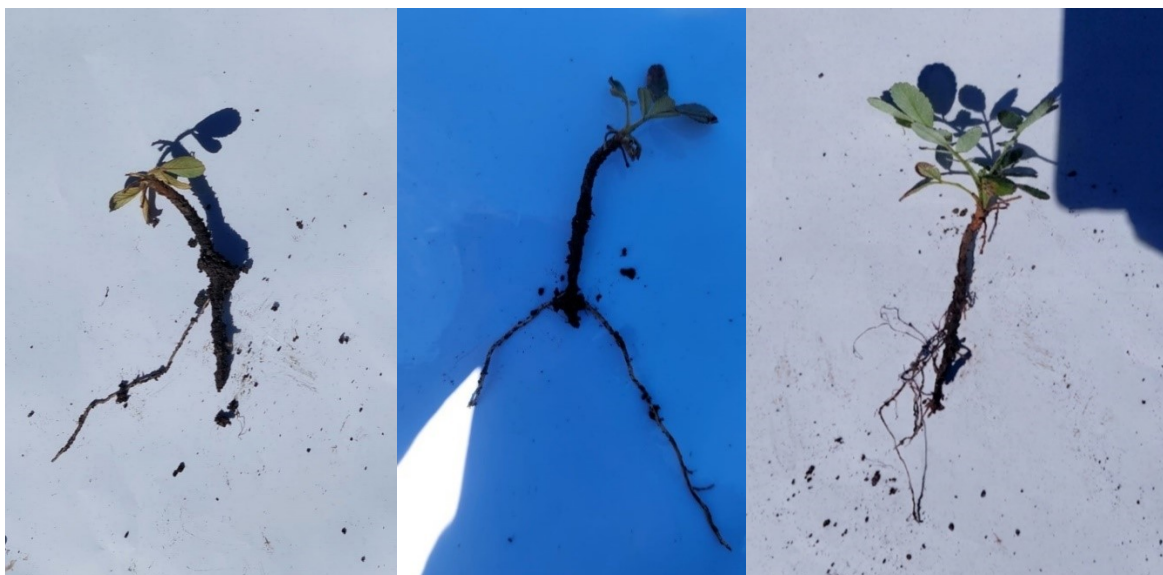
Comparación del desarrollo radicular a los 90 días de esquejes de Polylepis sp. inoculados con Pseudomonas sp.



Fuente: Archivo fotográfico propio, 2025.

Figura 29

Comparación del número de folíolos en esquejes de Polylepis sp. inoculados con Pseudomonas sp. a los 90 días.



Fuente: Archivo fotográfico propio, 2025.

Figura 30

Comparación del número de folíolos en esquejes de Polylepis sp. inoculados con Bacillus sp. a los 90 días.



Fuente: Archivo fotográfico propio, 2025.

Figura 31

Comparación de la altura de esquejes de Polylepis sp. inoculados con Bacillus sp. y Pseudomonas sp.



Fuente: Archivo fotográfico propio, 2025.

WMJ