

**UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN**

**Facultad de Ciencias**

**Escuela Profesional de Biología - Microbiología**

**ESTUDIO DEL “NUDO NEGRO” DE LA QUEÑO A (*Polylepis tarapacana*) EN EL  
DEPARTAMENTO DE TACNA: DISTRIBUCIÓN, RELACIÓN ENTRE INCIDENCIA  
Y DASOMETRÍA, Y CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA Y MOLECULAR**

**TESIS**

PRESENTADA POR:

**Bach. Yarina Isabel Flores Ramos**

Para optar el Título Profesional de:

**BIÓLOGO MICROBIÓLOGO**

**TACNA - PERÚ**

**2025**



6



ACTA DE SUSTENTACION DE TESIS Nro. 455

En la ciudad de Tacna, en el auditorium de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann; siendo las 9:16 horas del día 11 de NOVIEMBRE del 2025, estando presente el jurado calificador nominado con Resolución de Facultad Nro. 11520 - 2024 FACI-UNJBG, conformado por los siguientes docentes:

Dr. Dolores Miguel Castillo Cotrina (Presidente)  
Dr. Giovanni Adenhir Aragon Alvarado (Secretario)  
Dra. Liduvina Sulca Quispe (Vocal)

Acto seguido, se dio lectura a la Resolución correspondiente, y del mismo modo se informa a la (al) Bachiller que el acto de sustentación constará de dos partes: (I) exposición y sustentación de la tesis, (II) absolucón de preguntas del jurado. Todo ello en un tiempo no mayor a 60 minutos ni menor a 30 minutos. A continuación, el presidente del Jurado instó a la (al) Bachiller:

Yarina Isabel Flores Ramos

a exponer la Tesis titulada:

ESTUDIO DEL "NUDO NEGRO" DE LA CUENCA (Polytepis tarapacana) EN EL DEPARTAMENTO TACNA: DISTRIBUCION, RELACION ENTRE INCIDENCIAS Y DASCOMETRIA Y CARACTERIZACION MORFOLOGICA Y MOLECULAR

para optar el Título Profesional de BIÓLOGO MICROBIÓLOGO

Siendo las 10:43 horas, la (el) tesista concluye su exposición, luego se procedió a la formulación de las preguntas por parte de los miembros del jurado calificador, terminado este proceso, se invitó al público presente a abandonar la sala de sustentación para que los miembros del jurado emitan su calificación de acuerdo a reglamento. El promedio de la calificación dio el siguiente resultado: APROBADO POR UNANIMIDAD, con nota de 17, de acuerdo al Reglamento de Grados y Títulos de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann - Tacna.

Siendo las 10:43 horas, se dio por concluido el acto de sustentación de la tesis, firmando los miembros del jurado calificador, en señal de conformidad.

Dolores Miguel Castillo Cotrina  
Presidente

Dr. Giovanni Aragon Alvarado  
Secretario

Liduvina Sulca Quispe  
Vocal

## CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo Liduvina Sulca Quispe en mi condición de asesor acreditado por la Resolución de Facultad N.º 11008-2024-FACI-UN/JBG de la tesis de investigación titulada: ESTUDIO DEL “NUDO NEGRO” DE LA QUEÑO A (*Polylepis tarapacana*) EN EL DEPARTAMENTO DE TACNA: DISTRIBUCIÓN, RELACIÓN ENTRE INCIDENCIA Y DASOMETRÍA, Y CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA Y MOLECULAR, presentado por la Bachiller Yarina Isabel Flores Ramos, para optar el Título de Biólogo Microbiólogo.

Habiendo cumplido con lo establecido en el reglamento de originalidad y de similitud de trabajos de investigación y producción intelectual, considerando que según la revisión, evaluación y análisis realizado a través del software de similitud textual TURNITIN, cuenta con el nivel de similitud permitido cuyo porcentaje es 3%. Por lo que **CERTIFICO LA SIMILARIDAD** de la tesis, la cual está de acuerdo al nivel **PERMITIDO**, para continuar con los trámites correspondientes y para su **publicación en el repositorio Institucional**.

Se emite el presente certificado con fines de continuar con los trámites respectivos para su obtención de título.

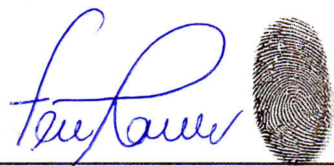
Tacna, 19 de noviembre de 2025



ASESOR

DNI: 28219298

Nombre: Liduvina Sulca Quispe



TESISTA

DNI: 76984408

Nombre: Yarina Isabel Flores Ramos

## DEDICATORIA

*Al Dios Altísimo y a mi familia.*

## **AGRADECIMIENTOS**

Esta investigación ha sido el resultado de la constante búsqueda de información, mentoría y motivación de quienes reconozco en esta sección.

A la Dra. Liduvina Sulca, quien como asesora brindó orientación constante y valiosa durante el desarrollo de este trabajo.

A la PhD st. Mary K. Childress, del Quandt Mycology Lab de la Universidad de Colorado Boulder, por su participación fundamental en la etapa de caracterización molecular, así como por su acompañamiento en la recolección de datos.

Al Grupo de Investigación "Arediza" de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann a cargo del Dr. Pablo Franco, por su apoyo logístico en los viajes de campo y la disposición de su laboratorio. Agradezco especialmente a Javier Ignacio y Josue Pumasupa por el soporte técnico brindado durante el trabajo de campo, y a Alex Yaja por su apoyo en el procesamiento de datos.

Al Laboratorio de Biotecnología Enzimática y del Laboratorio de Biotecnología Industrial de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, por brindarme acceso a sus instalaciones para el desarrollo de diversas actividades experimentales de esta investigación.

## CONTENIDO

|   |           |
|---|-----------|
| DEDICATORIA.....  | iv        |
| AGRADECIMIENTOS.....  | v         |
| CONTENIDO.....  | vi        |
| ÍNDICE DE TABLAS.....   | ix        |
| ÍNDICE DE FIGURAS.....  | x         |
| RESUMEN.....  | xi        |
| ABSTRACT.....   | xii       |
| <b>I. INTRODUCCIÓN.....</b>                                   | <b>13</b> |
| <b>1.1. Planteamiento del Problema.....</b>                   | <b>13</b> |
| <b>1.2. Hipótesis.....</b>                                    | <b>15</b> |
| <b>1.2.1. Hipótesis General.....</b>                          | <b>15</b> |
| <b>1.2.2. Hipótesis Específicas.....</b>                      | <b>15</b> |
| <b>1.3. Objetivos.....</b>                                    | <b>15</b> |
| <b>1.3.1. Objetivo General.....</b>                           | <b>15</b> |
| <b>1.3.2. Objetivos Específicos.....</b>                      | <b>16</b> |
| <b>1.4. Antecedentes de la Investigación.....</b>             | <b>16</b> |
| <b>1.5. Fundamento Teórico.....</b>                           | <b>18</b> |
| <b>1.5.1. Distribución y Hábitat de <i>Polylepis</i>.....</b> | <b>18</b> |
| <b>1.5.2. Importancia de <i>Polylepis</i>.....</b>            | <b>19</b> |
| <b>1.5.3. Estado de Conservación de <i>Polylepis</i>.....</b> | <b>21</b> |
| <b>1.5.4. Amenazas de <i>Polylepis</i>.....</b>               | <b>22</b> |

|         |  |    |
|---------|--|----|
| 1.5.5.  | Taxonomía de <i>Polylepis tarapacana</i> .....   | 27 |
| 1.5.6.  | Distribución y Hábitat de <i>Polylepis tarapacana</i> .....  | 27 |
| 1.5.7.  | Morfología de <i>Polylepis tarapacana</i> .....  | 28 |
| 1.5.8.  | “Nudo negro” de <i>Polylepis tarapacana</i> .....  | 28 |
| 1.5.9.  | Taxonomía de <i>Paraleptosphaeria polylepidis</i> .....  | 30 |
| 1.5.10. | Características Morfológicas de <i>Paraleptosphaeria polylepidis</i> .....   | 31 |
| 1.5.11. | Distribución Espacial.....   | 32 |
| 1.5.12. | Medición de Enfermedades.....  | 33 |
| 1.5.13. | Dasometría.....  | 34 |
| 1.5.14. | Caracterización Morfológica y Molecular de Hongos .....  | 35 |
| II.     | MATERIALES Y MÉTODOS .....   | 37 |
| 2.1.    | Diseño de la Investigación y Procesamiento de Datos .....  | 37 |
| 2.2.    | Población y Muestra .....  | 38 |
| 2.2.1.  | Población.....   | 38 |
| 2.2.2.  | Muestra .....  | 38 |
| 2.3.    | Área de Estudio.....   | 38 |
| 2.4.    | Determinación de la Incidencia y Severidad del “nudo negro” de la Queñoa ( <i>P. tarapacana</i> ) en el Departamento de Tacna.....   | 40 |
| 2.5.    | Determinación de la Distribución del “nudo negro” de la queñoa ( <i>P. tarapacana</i> ) en el Departamento de Tacna .....  | 41 |
| 2.6.    | Relación entre la Incidencia del “nudo negro” de la Queñoa ( <i>P. tarapacana</i> ) y la Estructura Dasométrica de <i>Polylepis tarapacana</i> en el Departamento de Tacna ..... | 43 |
| 2.7.    | Caracterización Morfológica del Agente Asociado al “nudo negro” de <i>Polylepis tarapacana</i> .....   | 47 |

|   |     |
|---|-----|
| 2.8. Caracterización Molecular del Agente Asociado al “nudo negro” de <i>Polylepis tarapacana</i> .....   | 48  |
| III. RESULTADOS .....   | 52  |
| 2.9. Determinación de la Incidencia y Severidad del “nudo negro” de la Queñoa ( <i>P. tarapacana</i> ) en el Departamento de Tacna.....                                       | 52  |
| 3.1. Determinación de la Distribución del “nudo negro” de la Queñoa ( <i>P. tarapacana</i> ) en el Departamento de Tacna .....  | 56  |
| 3.2. Relación entre la Incidencia del “nudo negro” de la Queñoa ( <i>P. tarapacana</i> ) y la Estructura Dasométrica de <i>P. tarapacana</i> en el Departamento de Tacna..... | 65  |
| 3.3. Caracterización Morfológica y Molecular del Agente Asociado al “nudo negro” de la Queñoa ( <i>Polylepis tarapacana</i> ) del Departamento de Tacna .....                 | 72  |
| IV. DISCUSIÓN .....   | 76  |
| V. CONCLUSIONES.....  | 83  |
| VI. RECOMENDACIONES.....  | 84  |
| VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....   | 85  |
| VIII. ANEXOS .....  | 101 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|   |    |
|---|----|
| <b>Tabla 1</b> <i>Especies de Polylepis en la Lista Roja de la UICN</i> .....         | 22 |
| <b>Tabla 2</b> <i>Tipos de Distribución Espacial</i> .....                            | 32 |
| <b>Tabla 3</b> <i>Descripción de Variables Dasométricas Comunes</i> .....             | 34 |
| <b>Tabla 4</b> <i>Clasificación de Parcelas según su Incidencia</i> .....             | 40 |
| <b>Tabla 5</b> <i>Resultados de la Incidencia por Parcela</i> .....                   | 54 |
| <b>Tabla 6</b> <i>Resultados de la Prueba de Shapiro-Wilk</i> .....                   | 66 |
| <b>Tabla 7</b> <i>Resultados de la Prueba de Kruskal-Wallis</i> .....                 | 67 |
| <b>Tabla 8</b> <i>Resultados de la Prueba de Dunn para el Diámetro de Fuste</i> ..... | 68 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| <b>Figura 1</b> <i>Mapa de Distribución de Polylepis en el Altiplano</i> .....                                   | 18 |
| <b>Figura 2</b> <i>Morfología de Polylepis tarapacana</i> .....  | 28 |
| <b>Figura 3</b> <i>Determinación de la Incidencia y Colección de Datos de la Estructura Dasométrica</i><br>..... | 43 |
| <b>Figura 4</b> <i>Esquema de la Caracterización Morfológica del “nudo negro”</i> .....                          | 48 |
| <b>Figura 5</b> <i>Esquema de la Caracterización Molecular del “nudo negro”</i> .....                            | 49 |
| <b>Figura 6</b> <i>Mapa de Distribución e Incidencia del “nudo negro” de P. tarapacana</i> .....                 | 53 |
| <b>Figura 7</b> <i>Gráficos de la Función L de Ripley según Incidencia</i> .....                                 | 57 |
| <b>Figura 8</b> <i>Mapa de Interpolación IDW según la Severidad Ponderada por Parcela</i> .....                  | 59 |
| <b>Figura 9</b> <i>Gráfico de Radar de la Orientación según Incidencia</i> .....                                 | 64 |
| <b>Figura 10</b> <i>Histogramas de los Datos de Variables Dasométricas</i> .....                                 | 65 |
| <b>Figura 11</b> <i>Correlación de Spearman entre Incidencia y Variables Dasométricas</i> .....                  | 67 |
| <b>Figura 12</b> <i>Boxplot del Diámetro de Fuste por Clasificación de Incidencia</i> .....                      | 68 |
| <b>Figura 13</b> <i>Biplot del Análisis de Componentes Principales (PCA)</i> .....                               | 71 |
| <b>Figura 14</b> <i>Estructuras Macroscópicas y Microscópicas del Agente Asociado al “nudo negro”</i><br>.....   | 73 |
| <b>Figura 15</b> <i>Árbol Filogenético de Máxima Verosimilitud (ML) de Leptosphaeriaceae</i> .....               | 75 |

## RESUMEN

Los bosques de *Polylepis tarapacana* crecen a la mayor elevación en el mundo, habita en los Andes de Sudamérica en un entorno hostil y adverso para la vida. Aun así, alberga gran diversidad de especies y brinda servicios ecosistémicos. Lamentablemente, son ecosistemas altamente fragmentados y frágiles, amenazados por la actividad humana y cambio climático. En Bolivia, el “nudo negro” es el signo del hongo *Paraleptosphaeria polylepidis* y ha sido reportado como el causal del declive de *P. tarapacana*. Ante la observación del “nudo negro” en el departamento de Tacna, se desarrolló este estudio para determinar su distribución, incidencia y caracterización morfológica y molecular.

Para ello, se evaluaron 23 parcelas circulares, con un total de 1588 individuos analizados.

Se determinó que el “nudo negro” de la queñoa (*Polylepis tarapacana*) en el departamento de Tacna presentó un patrón de distribución espacial agrupado, con algunas áreas mostrando patrones dispersos o aleatorios. La incidencia promedio fue del 32,33 %, y si bien mostró una relación moderada con el diámetro de fuste, esta no fue significativa; sin embargo, según análisis por categorías, la incidencia difirió significativamente entre categorías de diámetro de fuste, siendo mayor en árboles con diámetro de fuste menores. Y la caracterización morfológica y molecular confirmó que el agente causal corresponde al hongo *Paraleptosphaeria polylepidis*, constituyendo el segundo reporte de esta especie y ampliando su distribución al departamento de Tacna, Perú.

*Palabras clave:* *Paraleptosphaeria polylepidis*, enfermedades forestales, bosques altoandinos, hongos fitopatógenos

## ABSTRACT

The forests of *Polylepis tarapacana* grow at the highest elevations in the world, inhabiting the Andes of South America in a harsh and adverse environment for life. Nevertheless, they harbor a high diversity of species and provide important ecosystem services. Unfortunately, these are highly fragmented and fragile ecosystems, threatened by human activity and climate change. In Bolivia, the “black knot” is the symptom caused by the fungus *Paraleptosphaeria polylepidis* and has been reported as responsible for the decline of *P. tarapacana*. Given the observation of the “black knot” in the department of Tacna, this study was conducted to determine its distribution, incidence, and morphological and molecular characterization.

For this purpose, 23 circular plots were evaluated, with a total of 1,588 individuals analyzed. It was determined that the “black knot” of *Polylepis tarapacana* in the department of Tacna exhibited a clustered spatial distribution pattern, although some areas showed dispersed or random patterns. The average incidence was 32.33 %, and although it showed a moderate relationship with stem diameter, this was not significant; however, according to categorical analysis, incidence differed significantly between stem diameter categories, being higher in trees with smaller stem diameter. Morphological and molecular characterization confirmed that the causal agent corresponds to the fungus *Paraleptosphaeria polylepidis*, constituting the second report of this species and expanding its known distribution to the department of Tacna, Peru.

*Keywords:* *Paraleptosphaeria polylepidis*, forest diseases, high-Andean forests, phytopathogenic fungi

## I. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Planteamiento del Problema

Los bosques del género *Polylepis* forman parches altamente fragmentados a lo largo del altiplano andino. Estos ecosistemas albergan gran biodiversidad y proporcionan servicios ecosistémicos esenciales, como la regulación de la escorrentía, la captación de agua y la reducción de la erosión (Boza & Kessler, 2022; Cuyckens & Renison, 2018; Navarro et al., 2010). Sin embargo, a lo largo de los años, la fragmentación y reducción de sus poblaciones se ha incrementado de manera alarmante, generando preocupación tanto en la comunidad científica como en las poblaciones locales, debido al riesgo que ello representa para la biodiversidad y la estabilidad ecológica. En este contexto, *Polylepis tarapacana*, reconocida como la especie arbórea que crece a mayor altitud en el mundo (Azócar et al., 2007), se enfrenta a una situación particularmente crítica.

Entre las amenazas emergentes para esta especie se encuentra una enfermedad fúngica conocida como “nudo negro”, reportada en *P. tarapacana* en el Parque Nacional Sajama, Bolivia; la cual está asociada al decaimiento y aumento de la mortalidad de los individuos (Coca-Morante, 2012; Macía et al., 2005). Esta enfermedad se manifiesta mediante la aparición de protuberancias oscuras en las ramas, denominadas “nudos negros”, que le dan su nombre común. El agente fúngico asociado ha sido identificado como *Paraleptosphaeria polylepidis* (Piątek et al., 2020).

Asimismo, signos similares se han observado en otras especies del género *Polylepis*, como *P. subtusalbida* en el Parque Nacional Tunari (Cochabamba, Bolivia) (Coca-Morante, 2022), y en *P. albicans* y *P. weberbaueri* en el Parque Nacional Huascarán (Áncash, Perú), donde se han identificado especies no descritas de los géneros *Paraleptosphaeria*

y *Plenodomus* (M. Childress, comunicación personal, 2024). De igual manera, en la región de Arica y Parinacota (Chile) se investiga actualmente la etiología del daño en *P. tarapacana* y las posibles medidas de control biológico de la enfermedad.

Hasta la fecha, Bolivia constituye el único país donde la presencia del “nudo negro” ha sido reportada formalmente en fuentes científicas. En el caso del Perú, no existen estudios publicados que documenten la ocurrencia de esta enfermedad en *P. tarapacana* en el departamento de Tacna.

Ante el avistamiento del “nudo negro” y síntomas de decaimiento en los bosques de *P. tarapacana* en Tacna, surge la necesidad de investigar su distribución, su posible relación con la estructura del bosque y la identificación del agente causal y caracterizarlo morfológica y molecularmente. En este contexto, la presente investigación se planteó con el propósito de responder la siguiente pregunta principal:

¿Cómo es la distribución del “nudo negro” de la queñoa (*Polylepis tarapacana*), cómo se relaciona su incidencia con la estructura dasométrica de *Polylepis tarapacana* en el departamento de Tacna, y cuáles son las características morfológicas y moleculares del agente asociado?

Y las preguntas secundarias:

- ¿Cómo es la distribución del “nudo negro” de la queñoa (*Polylepis tarapacana*) en el departamento de Tacna?
- ¿Cuál es la relación entre la incidencia del “nudo negro” de la queñoa (*Polylepis tarapacana*) y la estructura dasométrica de *Polylepis tarapacana* en el departamento de Tacna?
- ¿Cuáles son las características morfológicas y moleculares del agente asociado al “nudo negro” de la queñoa (*Polylepis tarapacana*) del departamento de Tacna?

## **1.2. Hipótesis**

### **1.2.1. Hipótesis General**

El “nudo negro” de la queñoa (*Polylepis tarapacana*) presenta un patrón de distribución agrupado, una alta incidencia influenciada significativamente por la estructura dasométrica de *Polylepis tarapacana* en el departamento de Tacna, y se encuentra asociado a uno o más agentes fúngicos.

### **1.2.2. Hipótesis Específicas**

- El “nudo negro” de la queñoa (*Polylepis tarapacana*) presenta un patrón de distribución espacial agrupado en el departamento de Tacna
- El “nudo negro” de la queñoa (*Polylepis tarapacana*) presenta una alta incidencia significativamente influenciada por la estructura dasométrica de *Polylepis tarapacana* en el departamento de Tacna.
- El agente asociado al “nudo negro” de la queñoa (*Polylepis tarapacana*) del departamento de Tacna presenta características morfológicas y moleculares que corresponden a una o más especies fúngicas, incluyendo a *Paraleptosphaeria polylepidis*.

## **1.3. Objetivos**

### **1.3.1. Objetivo General**

Determinar la distribución del “nudo negro” de la queñoa (*Polylepis tarapacana*), relacionar la incidencia del “nudo negro” y la estructura dasométrica de *Polylepis tarapacana* en el departamento de Tacna y caracterizar morfológica y molecularmente al agente asociado.

### 1.3.2. Objetivos Específicos

- Determinar la distribución del “nudo negro” de la queñoa (*Polylepis tarapacana*) en el departamento de Tacna.
- Relacionar la incidencia del “nudo negro” de la queñoa (*Polylepis tarapacana*) y la estructura dasométrica de *Polylepis tarapacana* en el departamento de Tacna.
- Caracterizar morfológica y molecularmente al agente asociado al “nudo negro” de la queñoa (*Polylepis tarapacana*) del departamento de Tacna.

### 1.4. Antecedentes de la Investigación

Macía y colaboradores (2005) reportaron por primera vez al “nudo negro” en *P. tarapacana* en el Parque Nacional de Sajama, Bolivia. Determinaron que el espécimen corresponde a *Leptosphaeria polylepidis*, y su morfología se compone de ascomas agregados en racimos sobre un estroma negro con superficie agrietada y papila redondeada, con pared de varias capas de células melanizadas marrones; pseudoparafisis numerosas, estrechas y sin recubrimiento gelatinoso, ascas basales, cilíndricas que contienen ocho ascosporas inicialmente hialinas que se tornan marrones y fusiformes al madurar, y presentan tres septos y células terminales agudas.

Más adelante, Coca-Morante (2012) evaluó árboles de *P. tarapacana* con decaimiento en el Distrito 3 del Parque Nacional Sajama, Bolivia. Estudió una parcela permanente de 100 x 100 metros y clasificó cada árbol de *P. tarapacana* como árboles aparentemente sanos, árboles enfermos, árboles muertos y árboles quemados; además evaluó su distribución espacial, estimó su incidencia y caracterizó morfológicamente al agente asociado al decaimiento de *P. tarapacana*. Y sugirió que *Leptosphaeria polylepidis* causa el decaimiento y aparición de nudos negros en *P. tarapacana*. Los síntomas observados en las plantas con decaimiento se caracterizaron por amarillamiento de hojas,

muerte regresiva de ramas, defoliación y muerte progresiva de *P. tarapacana*. Además, la enfermedad se presentó con un patrón agrupado, con una incidencia promedio de 54% y el 21% fueron individuos muertos.

Años más tarde, Piątek y su equipo (2020) buscaron resolver la ubicación filogenética de *Leptosphaeria polylepidis*, mediante análisis morfológico y molecular. Para lo cual, tomaron muestras de cuatro especímenes en el Parque Nacional de Sajama, Bolivia y aislaron el ADN para luego amplificar los marcadores genéticos SSU, ITS, LSU y TEF1. Los resultados de los análisis filogenéticos moleculares colocaron a *L. polylepidis* en un clado bien respaldado del género *Paraleptosphaeria*, el cual es morfológicamente similar a *Leptosphaeria*, pero genéticamente diferente; entonces, propusieron que el nombre más apropiado era *Paraleptosphaeria polylepidis*. Adicionalmente, de manera inesperada hallaron conidiomas desconocidos sobre los pseudotecios de *Pa. polylepidis*, por lo que aislaron el ADN y amplificaron los genes ITS y LSU para determinar la presencia de *Sajamaea mycophila*, un micoparásito que podría ser un potencial biocontrolador de *Pa. polylepidis*.

También se ha estudiado la enfermedad del “nudo negro” en el Parque Nacional Huascarán (Áncash, Perú), en bosques de *Polylepis albicans* y *Polylepis weberbaueri*, donde se han identificado especies no descritas de los géneros *Paraleptosphaeria* y *Plenodomus* (M. Childress, comunicación personal, 2024).

En la actualidad, el “nudo negro” en bosques de *P. tarapacana* también se está investigando en Arica y Parinacota en Chile con el objetivo de identificar los microorganismos asociados a la enfermedad, evaluar su distribución e incidencia, y explorar potenciales agentes de control biológico (Fundación para la Innovación Agraria (FIA), 2022).

## 1.5. Fundamento Teórico

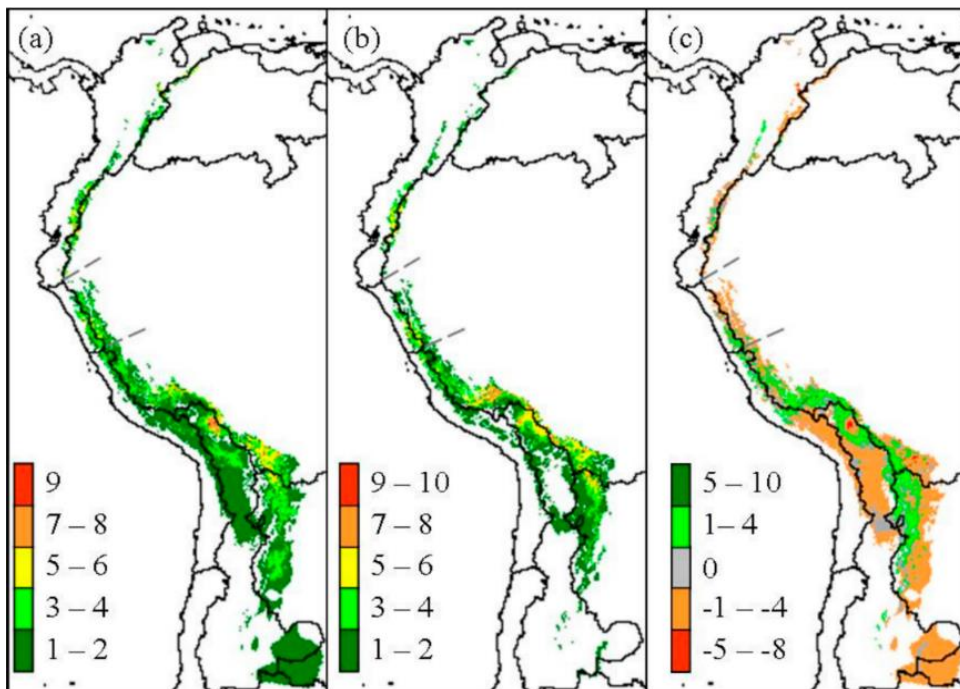
### 1.5.1. Distribución y Hábitat de *Polylepis*

El género *Polylepis* comúnmente conocido como “queñoa”, está conformado por árboles o arbustos que forman parches en la Cordillera de los Andes en Sudamérica, abarcando los países de Venezuela, Ecuador, Perú, Bolivia, Chile y Argentina (Purcell et al., 2004; Kessler, 1995).

Su distribución se encuentra dentro de los Andes tropicales y subtropicales (Figura 1), en las ecorregiones del páramo desde el oeste de Venezuela hasta Ecuador, jalca en el norte del Perú y la puna del centro de Perú hasta Argentina (Zutta & Rundel, 2017).

**Figura 1**

*Mapa de Distribución de Polylepis en el Altiplano*



*Nota.* La imagen muestra la riqueza a: pasada, b: presente y c: futura de especies de *Polylepis* predicha con CCSM de Zutta & Rundel (2017).

El clima en el que habita es extremo, agravado aún más por el cambio climático. Está expuesto a temperaturas frías, heladas en todo el año, alta radiación UV, gran variación de temperatura entre día y noche, disponibilidad de agua marcada por la estacionalidad y laderas altas, y vientos fuertes (Rehm & Feeley, 2013).

*Polylepis* es el género de árboles que crece a la mayor elevación en el mundo, desde 900 m. s. n. m (*P. australis* en Argentina) hasta 5200 m. s. n. m. (*P. trapacana* en Sajama, Bolivia) (Navarro et al., 2010; Renison et al., 2013; Zutta et al., 2012).

Comúnmente, forma bosques siempreverdes notablemente fragmentados cuando se ubican por encima de los 3000 m. s. n. m. (Zutta & Rundel, 2017). Su patrón fragmentado ha dado pie a controversias a lo largo de los años. Por un lado, se sostiene la posibilidad de un patrón fragmentado natural dadas las condiciones geográficas y climáticas por su topografía accidentada y clima extremo; y por otro lado, se sugiere que la intervención humana es la causa principal de su fragmentación, atribuido los incendios, tala, ganado y construcciones; sin embargo, muchos autores optan por integrar ambas posibilidades (Chanove-Manrique & Cárdenas-Pillco, 2024; Renison et al., 2018; Toivonen, 2014; Kessler et al., 2014).

### **1.5.2. Importancia de *Polylepis***

*Polylepis* es un género que sobrevive a condiciones poco comunes, es por eso que mantiene una relevante importancia en el ecosistema, tanto para la biodiversidad de especies que alberga, como también para el equilibrio abiótico.

- **Resiliencia Climática**

*Polylepis* es un género que crece en uno de los entornos más extremos del mundo, en los andes Altoandinos, caracterizados por su gran elevación, fuerte radiación UV,

heladas constantes, baja presión de oxígeno y suelos pobres (Fjeldså, 2002; Kessler, 2014). Sin embargo, se ha adaptado morfológica y genéticamente, demostrando resiliencia ante adversidades (Rada et al., 1996; Renison et al., 2002). Por ejemplo, su capacidad de rebrote ante el ramoneo del ganado e incendios forestales (Argibay & Renison, 2018; Renison et al., 2002), su adaptación al estrés de agua en época seca y asimilación de carbono en bajas temperaturas (Rada et al., 1996), y su amplia distribución de especies en los nichos ecológicos de los Andes (Kessler & Schmidt-Lebuhn, 2006).

- **Salud del Suelo**

Las formaciones de *Polylepis* representan un punto clave para el mantenimiento de un suelo saludable, alejado de la erosión. Pues los suelos de *Polylepis* son importantes reservorios de carbono, favoreciendo un ecosistema de suelos más saludable, estable y productivo (Mosquera et al., 2024; Vásquez et al., 2014).

Por ejemplo, *P. tarapacana* mejora significativamente la salud del suelo y la resiliencia de los ecosistemas áridos. Los suelos asociados a esta especie presentan mayores niveles de materia orgánica y pH, así como una alta actividad enzimática, respiración heterotrófica, respiración de azufre y una notable diversidad de bacterias y hongos (Gutiérrez-Cortés et al., 2025).

- **Regulación del Ciclo del Agua**

Los bosques de *Polylepis*, son fundamentales en el funcionamiento del ciclo del agua. Pues contribuyen a la regulación hídrica a través de procesos como la interceptación de lluvia, la transpiración y el almacenamiento de agua en el suelo (Célleri & Feyen, 2009). Los bosques realizan su aporte en integración a ecosistemas como bofedales y pajonales para la reserva subterránea de agua (Cervantes et al., 2022), y la acumulación de materia

orgánica que favorece la retención hídrica y el almacenamiento de carbono (Mosquera et al., 2024).

- **Hábitat**

Los bosques del género *Polylepis*, que crecen entre los 900 y 5200 m s.n.m. en la Cordillera de los Andes representan un raro hábitat que alberga gran diversidad y especies únicas. En cuanto a aves, tanto especialistas como generalistas aprovechan las diferencias estructurales de los parches como nicho (Astudillo et al., 2020). Incluso los fragmentos pequeños y de mayor elevación albergan gran cantidad de aves (Sevillano-Ríos & Rodewald, 2021). Además, también es hábitat de una gran diversidad de plantas, mamíferos, mariposas, reptiles, hepáticas, etc.; entre los cuales se encuentran especies endémicas, amenazadas o casi amenazadas que son puestas en riesgo a la vez que los bosques de *Polylepis* son debilitados (Gareca et al., 2010; Gradstein & León-Yáñez, 2020), y que aprovechan la variedad de microclimas dentro de los bosques de *Polylepis* a lo largo y alto de la Cordillera como hogar específico o generalista.

Lamentablemente, la falta de conectividad entre parches y la reducción de su área se relaciona a menor riqueza (Lloyd & Marsden, 2008; Sevillano-Ríos & Rodewald, 2021).

### **1.5.3. Estado de Conservación de *Polylepis***

Según la Lista Roja de Especies Amenazadas de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN), (2024), de entre las especies de *Polylepis*, hay 4 especies en peligro crítico, 28 en peligro, 5 en estado vulnerable, 5 casi amenazadas y tan solo una en preocupación menor (Tabla 1).

La situación actual del estado de conservación de *Polylepis* afecta a su propia integridad y además pone en riesgo la estabilidad de su entorno.

**Tabla 1***Especies de Polylepis en la Lista Roja de la UICN*

| <i>N° de especies</i> | <i>Categoría</i>    | <i>Especie(s)</i>   |
|-----------------------|---------------------|---|
| 1                     | Datos insuficientes | <i>P. racemosa</i>  |
| 1                     | Menor preocupación  | <i>P. incana</i>  |
| 5                     | Casi amenazado      | <i>P. tomentella, P. canoi, P. weberbaueri, P. rugulosa, P. tarapacana</i>  |
| 5                     | Vulnerable          | <i>P. serícea, P. incanoides, P. crista-galli, P. argéntea, P. besseri</i>  |
| 28                    | En peligro          | <i>P. lanuginosa, P. simpsoniae, P. mycrophylla, P. acomayensis, P. ochreata, P. incarum, P. longipilosa, P. pallidistigna, P. hieronymi, P. multijuga, P. pauta, P. pilosissima, P. pacensis, P. neglecta, P. reticulara, P. albicans, P. fjeldsaoi, P. serrata, P. subtusalbida, P. flavipila, P. loxensis, P. sacra, P. subsericans, P. pepeii, P. lanata, P. triacontandra, P. occidentalis, P. rodolfovasquezii,</i> |
| 4                     | En peligro crítico  | <i>P. quadrijuga, P. hunboldtii, P. frontinensis, P. nana</i>   |

*Nota.* Obtenido de UICN, (2024).

#### **1.5.4. Amenazas de *Polylepis***

Si bien la disposición fragmentada de los bosques de *Polylepis* puede ser natural, es un hecho que la actividad humana ha tenido una influencia significativa en su situación actual. De hecho, estudios fósiles indican que en los últimos mil años la acción antrópica ha sido el principal factor que indujo la hiperfragmentación y pérdida de más de la mitad de su cobertura original (Rodríguez & Behling, 2012; Valencia et al., 2018). Entre las principales amenazas que comprometen la estabilidad de *Polylepis* se encuentran el ramoneo del ganado, la tala, los incendios y el cambio climático.

- **Ramoneo del Ganado**

*Polylepis* representa un recurso alimenticio importante en ecosistemas altoandinos, ya que sus hojas poseen un alto contenido de nitrógeno, lo cual es aprovechado por el ganado doméstico. Sin embargo, esta interacción con herbívoros tiene consecuencias sobre la regeneración y estructura del bosque.

Diversos estudios han evaluado el impacto del ramoneo sobre *Polylepis australis*. Pues puede compensar el ramoneo moderado mediante nuevos brotes, aunque no logra recuperarse cuando la presión del ganado es alta; además, no existe una compensación completa ante ningún nivel de ramoneo (Giorgis et al., 2010). Además, con fuerte correlación entre el ramoneo y el crecimiento anual, se sugiere un ciclo en el que el rebrote atrae nuevamente el consumo de ganado, afectando especialmente el desarrollo de árboles en suelos rocosos.

Sin embargo, el ramoneo intensivo reduce significativamente la supervivencia y el crecimiento en gran elevación de *P. australis*, lo cual retarda la recuperación de los bosques (Teich et al., 2005). No obstante, la reducción de la carga ganadera puede generar cambios positivos que favorecen el aumento en la densidad de esta especie.

De manera complementaria, otro estudio indica que *P. australis* muestra su mayor tasa de crecimiento en ausencia de pastoreo, mientras que este disminuye rápidamente conforme aumenta la densidad ganadera hasta alcanzar 0,21 Unidades de Animal por hectárea (UA ha<sup>-1</sup>). Cuando la carga supera este umbral, no se registra crecimiento en biomasa y se incrementa la mortalidad de árboles (Giorgis et al., 2020). Por otra parte, *P. racemosa* también enfrenta las consecuencias del ramoneo intenso, que provoca que las poblaciones no se regeneren (Domic et al., 2014).

- **Tala**

La tala de *Polylepis* representa una de las principales amenazas para la conservación de sus bosques altoandinos, debido a la variedad de usos que su madera ofrece a las poblaciones locales. Históricamente, incluso desde épocas prehispánicas, *Polylepis* ha sido utilizada como leña, material de construcción de casas y mesas, lo cual refleja su alto valor cultural y económico (Hastorf et al., 2005). Además, es utilizada como fuente de carbón y lignina (Kessler, 1995b). Actualmente, su madera sigue siendo aprovechada, especialmente en zonas rurales donde escasean otras fuentes de materiales, lo que ha provocado una disminución en la regeneración natural del bosque. Un estudio afirma que entre todas las perturbaciones antropogénicas en bosques de *Polylepis*, la tala es la mayor amenaza a la que se enfrentan *Polylepis racemosa* y *P. subsericans* en Cusco, en la Cordillera Urubamba, que forma parte de la cadena montañosa de Vilcanota (Raudaskoski, 2014).

- **Incendios**

Los incendios en bosques montanos son frecuentes y, en muchos casos, son provocados intencionalmente para transformar el bosque en pastizales, con el objetivo de aprovechar su valor forrajero (Renison et al., 2002).

Numerosas investigaciones han evidenciado que la superficie de los bosques de *Polylepis* disminuye significativamente tras los incendios forestales. Entre ellos, un estudio fósil de polen identificó a los incendios como una de las principales causas de la distribución fragmentada de estos bosques (Gosling et al., 2009). Asimismo, otro análisis de polen y carbón fósil en la región de Jimbura reveló que las condiciones húmedas junto con incendios frecuentes podrían haber causado la rareza o incluso la extinción local de

*Polylepis* en esa zona; además, desde hace aproximadamente 1000 años, factores antropogénicos como la quema intencionada, la tala, el pastoreo y las actividades agrícolas han contribuido de manera significativa a la modificación de su distribución (Rodríguez & Behling, 2012).

Por otro lado, el fuego no se limita a moldear el área del bosque, sino que también influye en su regeneración y estructura. Un estudio encontró que, si *Polylepis australis* persiste tras incendios, el área del bosque se restringe a sectores de mayor altitud, posiblemente favorecido por una menor intensidad del ramoneo y condiciones de suelo más húmedas, asociadas a temperaturas más bajas y menor evapotranspiración (Argibay & Renison, 2018). Sin embargo, su prevalencia también es favorecida en áreas rocosas, porque crean una protección natural contra el fuego (Renison et al., 2002). Asimismo, se ha observado que se restringe a quebradas donde los efectos del fuego no son tan severos y existe menor impacto del ganado y mayor crecimiento de rebrotes y regeneración por semillas (Alinari et al., 2015).

Por último, se ha evidenciado en *Polylepis incana* que los incendios únicos reducen considerablemente el tamaño de las poblaciones de adultos y plántulas, lo cual puede apuntar a que el fuego sea la razón principal de su distribución discontinua por debajo de su límite altitudinal superior (Cierjacks et al., 2008). Y en *P. australis*, los incendios afectan negativamente a la supervivencia, producción de semillas y el crecimiento en las alturas (Renison et al., 2002).

- **Cambio Climático**

El cambio climático ha sido un factor determinante en la modificación de la distribución de *Polylepis* a lo largo del tiempo. Un estudio que modeló la distribución de

21 especies reveló que, en comparación con el Último Máximo Glacial (LGM), la extensión potencial actual de los bosques de *Polylepis* se ha reducido en un 36%. No obstante, algunas especies han experimentado una expansión de su rango, además, hay un 20% de zonas bioclimáticamente estables adecuadas para la expansión de *Polylepis* que son clave para su conservación (Zutta & Rundel, 2017). Si bien en el pasado, la extensión de *Polylepis* se vio favorecida por un clima húmedo y más cálido, actualmente el cambio climático está generando una situación cálida y seca que podría limitar su distribución futura (Gosling et al., 2009).

De hecho, el efecto del cambio climático tiene mucho que ver con las condiciones del hábitat de cada especie. Es así que un estudio comparó los posibles efectos del cambio climático en *Polylepis sericea* y *Polylepis quadrijuga* y se observó que ambas se ven comprometidas, pero *Polylepis quadrijuga* puede perder hasta el 99% de su área mientras que *P. sericea*, un 29% al ser más generalista y tolerar mejor la variabilidad en su nicho (Bedoya-Canas et al., 2024). *P. quadrijuga* por su lado, es altamente vulnerable al cambio climático, pues habita en condiciones ecológicas bien específicas de la Cordillera Oriental de Colombia, en zonas topográficamente aisladas cerca del límite superior (Caballero-Villalobos et al., 2021).

La vitalidad, el crecimiento y la productividad de *Polylepis australis* se ven favorecidos en altitudes intermedias, alrededor de los 1800 m s.n.m., donde se registran condiciones climáticas óptimas para su desarrollo. Sin embargo, debido al aumento de temperaturas asociado al cambio climático, esta especie podría verse limitada a altitudes más elevadas, donde si bien se mejora la germinación y la supervivencia de plántulas, el

crecimiento y la productividad de los árboles adultos no alcanzan su máximo desempeño (Marcora et al., 2008).

#### **1.5.5. Taxonomía de *Polylepis tarapacana***

Reino: Plantae

División: Tracheophyta

Clase: Magnoliopsida

Orden: Rosales

Familia: Rosaceae

Género: *Polylepis*

Especie: *Polylepis tarapacana* Phil. 1891

#### **1.5.6. Distribución y Hábitat de *Polylepis tarapacana***

*P. tarapacana* se distribuye en la frontera de Argentina, Bolivia, Chile, y Perú (Zutta et al., 2012). Es la especie que forma los bosques más altos en el mundo, crece desde los 4200 hasta los 5200 m.s.n.m. alrededor del Volcán Sajama (Bolivia) (Azócar et al., 2007).

Se adapta biométricamente a las condiciones extremas en donde habita según la elevación, pendiente, variaciones de temperatura y disponibilidad hídrica; tolera heladas y estrés hídrico (Azócar et al., 2007; García-Núñez et al., 2004; López et al., 2023; Rada et al., 2001). Tienen un característico patrón de distribución espacial fragmentado, dependiente de las condiciones climáticas y topografía montañosa, donde la variación en la temperatura, precipitación y la topografía crean parches con condiciones específicos (Braun, 1997). Está clasificada como especie casi amenazada (IUCN, 2024).

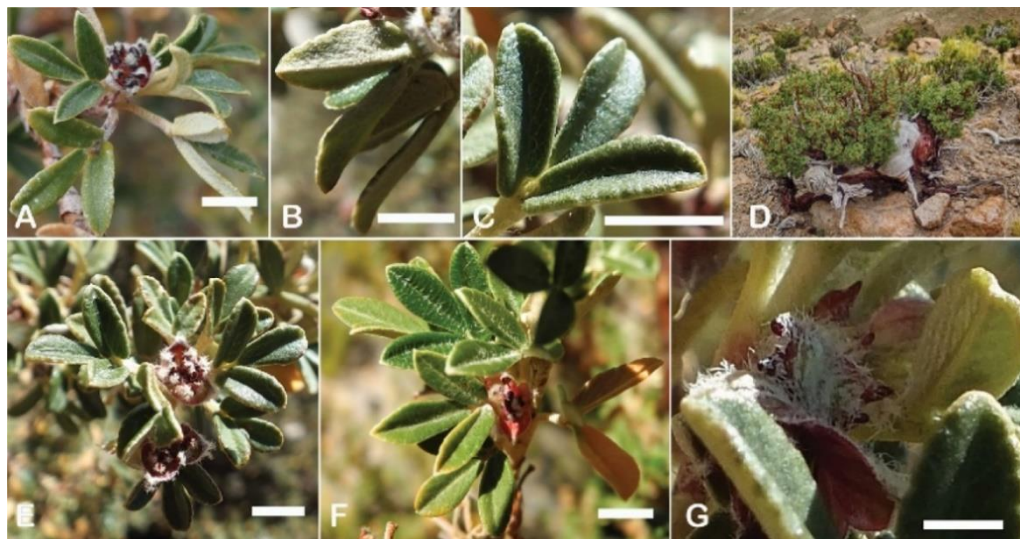
En el departamento de Tacna, los bosques de *P. tarapacana* tiene un área de 128,94 km<sup>2</sup> y se encuentran entre 4225 m.s.n.m. a 5175 m.s.n.m. (Franco et al., 2021).

### 1.5.7. Morfología de *Polylepis tarapacana*

*P. tarapacana* alcanza alturas de entre 1 y 5 metros, y presenta características morfológicas distintivas descritas por Boza & Kessler (2022): hojas imparipinnadas (1,3–1,7 × 0,9–1,2 cm), con folíolos obovados (0,7–0,8 × 0,3–0,4 cm), márgenes enteros o ligeramente crenados, ápice obtuso o agudo, haz rugoso con exudado resinoso y envés densamente pubescente. Sus inflorescencias colgantes (0,7–1,5 cm) contienen de 1 a 2 flores (5,1–8 mm de diámetro) con sépalos ovados y villosos, 9 a 13 estambres con anteras orbiculares, y estilos fimbriados. Los frutos son turbinados (4,1–5,2 × 3,1–7,2 mm), con 3 a 4 crestas aplanadas, espinas y densa vellosidad, características que contribuyen a su reconocimiento en campo (Figura 2).

**Figura 2**

*Morfología de Polylepis tarapacana*



*Nota.* A: flor, B: envés del foliolo, C: haz del foliolo, D: hábito, E: rama floral, F: flor, G: fruto. Tomado de Boza & Kessler (2022).

### 1.5.8. “Nudo negro” de *Polylepis tarapacana*

El “nudo negro” de *Polylepis tarapacana* es una enfermedad que fue reportada

por primera vez en el Parque Nacional de Sajama, Bolivia por Macía et al. en el año 2005, que también es conocida como declive de *Polylepis tarapacana* (Coca-Morante, 2012).

En su descripción original, el agente asociado al “nudo negro” fue identificado como *Leptosphaeria polylepidis*, aunque más tarde fue reclasificado al género *Paraleptosphaeria* por Piątek et al. (2020), pasando a denominarse *Paraleptosphaeria polylepidis*.

De acuerdo a González (1981), los signos de una enfermedad corresponden a las estructuras visibles del patógeno presentes sobre o dentro de los tejidos de una planta enferma. En este caso, el nombre “nudo negro” de *P. tarapacana* proviene precisamente de su signo característico: nudos negros o protuberancias oscuras irregulares, que corresponden a aglomeraciones de ascomas del hongo *Paraleptosphaeria polylepidis*, que se desarrollan en los tejidos de las ramas de *P. tarapacana* (Macía et al., 2005; Piątek et al., 2020).

Además del primer reporte en Bolivia, la enfermedad ha sido objeto de investigaciones recientes en otras regiones altoandinas. En Arica y Parinacota (Chile), se están realizando estudios orientados a identificar los microorganismos asociados, evaluar la distribución e incidencia de la enfermedad y explorar potenciales agentes de control biológico (Fundación para la Innovación Agraria [FIA], 2022). En el Parque Nacional Huascarán (Áncash, Perú), se han identificado especies no descritas de los géneros *Paraleptosphaeria* y *Plenodomus* asociadas a bosques de *Polylepis albicans* y *Polylepis weberbaueri* (M. Childress, comunicación personal, 2024). Asimismo, se ha registrado una enfermedad similar en *Polylepis subtusalbida* en el Parque Nacional Tunari (Cochabamba,

Bolivia), posiblemente causada por una especie distinta de *Leptosphaeria* (Coca-Morante, 2022).

En conjunto, estos hallazgos evidencian que la investigación sobre el “nudo negro” en *Polylepis*, y sus agentes asociados, pertenecen a un campo emergente de estudio, con gran relevancia ecológica y fitopatológica, con importantes vacíos de conocimiento.

#### **1.5.9. Taxonomía de *Paraleptosphaeria polylepidis***

*Paraleptosphaeria polylepidis* es el agente asociado al “nudo negro” de *P. tarapacana*. Actualmente, ha sido reportado oficialmente solo en el Parque Nacional de Sajama, Bolivia; teniendo como hospedero a *P. tarapacana* (Coca-Morante, 2022; Macía et al., 2005). Inicialmente fue descrito como *Leptosphaeria polylepidis* por Macía et al. (2005) y posteriormente se reclasificó al género *Paraleptosphaeria* con base en características morfológicas y moleculares (Piątek et al., 2020).

Reino: Fungi

Phylum: Ascomycota

Clase: Dothideomycetes

Orden: Pleosporales

Familia: Leptosphaeriaceae

Género: *Paraleptosphaeria*

Especie: *Paraleptosphaeria polylepidis*

(M.J. Macía, M.E. Palm & M.P. Martín)

Piątek, Flakus & Rodr. Flakus

#### 1.5.10. Características Morfológicas de *Paraleptosphaeria polylepidis*

*Paraleptosphaeria polylepidis* se caracteriza por su ascomata, la cual es visible en ramas de *P. tarapacana* y tiene forma similar a una mora pequeña, razón por la cual se le conoce comúnmente como nudo negro. Piątek et al. (2020) detalló sus características:

Presenta un estroma negro (1–3 × 2–7 mm) en el que son visibles pseudotecios; el estroma crece internamente e invade el tejido del huésped. Los pseudotecios (200–700 × 300–600 μm) son de color marrón oscuro a negro, con superficie rugosa, globosos a subglobosos, usualmente con la base sobresaliendo en estípites de 200–1000 μm que se fusionan en la base dentro del estroma. Las papilas son cortas o están ausentes.

El peridio (60–150 μm) es marrón pálido, está formado por un solo estrato paraplectenquimatoso de textura angularis, compuesto por varias capas de células isodiamétricas o ligeramente alargadas, de paredes delgadas. El hamatecio (1,5–4 μm) es persistente, formado por pseudoparáfisis delgadas, septadas, ramificadas y con numerosas anastomosis.

Los ascos (120–250 × 20–45 μm) son bitunicados, de forma cilíndrica a claviforme, ligeramente curvados, con un estípite corto y un ensanchamiento apical que forma una cámara ocular. Contienen de 5 a 8 ascosporas. Las ascosporas (45–60 × 14–23 μm) son de color marrón pálido, elipsoidales, más estrechas en el extremo superior, constreñidas en los septos, de paredes delgadas y uniformes, sin perispora ni capa gelatinosa, y presentan 2 a 4 septos.

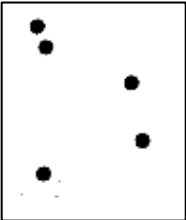
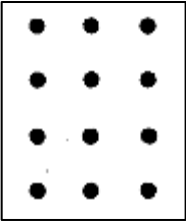

Así también, se conoce que *Pa. polylepidis* tiene un micoparásito natural que causa daños moderados en los ascomas: *Sajamaea mycophila* (Piątek et al., 2020).

### 1.5.11. Distribución Espacial

La distribución espacial se refiere a la disposición de individuos dentro de un área geográfica, pudiendo seguir patrones agrupados, dispersos o uniformes (Tabla 2) (Badii et al., 2011; Wei et al., 2025).

**Tabla 2**

*Tipos de Distribución Espacial*

| <b>Tipo</b> | <b>Descripción</b>  | <b>Representación gráfica</b>   |
|-------------|---|---|
| Aleatoria   | La distribución aleatoria ocurre cuando los individuos tienen la misma probabilidad de ocupar cualquier punto dentro del espacio. La presencia de un individuo es independiente de la presencia de otros, por lo que no existe interacción aparente entre ellos. Cada punto del área de estudio tiene la misma probabilidad de contener un individuo. |   |
| Uniforme    | La distribución uniforme o regular se presenta cuando la presencia de un individuo en un punto disminuye la probabilidad de encontrar otro individuo cercano. Este patrón señala repulsión o competencia entre individuos. Además, tiene pocas zonas de hacinamiento y densidad más homogénea.  |  |
| Agrupada    | La distribución agrupada ocurre cuando la presencia de un individuo aumenta la probabilidad de encontrar a otros individuos cercanos. Indica atracción o afinidad entre los individuos, generalmente causada por factores ambientales, reproductivos o de recursos. Es el patrón más común en la naturaleza.  |  |

*Nota.* Información basada en Badii et al. (2011).

En ecología, conocer los patrones de distribución espacial nos permite entender aspectos como competencia interna e interespecífica, sistemas de apareamiento, depredación, genética de poblaciones y la propagación de enfermedades contagiosas (Borregaard et al., 2008; Wei et al., 2025).

Y, para el análisis de datos espaciales existen diversos enfoques. Por ejemplo, el análisis de patrones espaciales evalúa si los individuos están distribuidos de manera aleatoria, agregada o uniforme, siendo la función K de Ripley ampliamente utilizada (Ripley, 1976). También se encuentra la interpolación espacial, como la interpolación por Ponderación Inversa de la Distancia (IDW), que permite estimar valores en ubicaciones no muestreadas y generar mapas continuos (Shepard, 1968; Fattorini et al., 2023).

#### **1.5.12. Medición de Enfermedades**

La medición de enfermedades puede realizarse con métodos directos cuantitativos entre los cuales se encuentran el cálculo de la incidencia y severidad.

La incidencia se define como la proporción o porcentaje de plantas enfermas dentro de una población evaluada (Cooke et al., 2002). Este método se considera directo porque cada planta evaluada puede clasificarse simplemente como infectada o no infectada, con base en la presencia de signos y/o síntomas visibles de la enfermedad (Cooke et al., 2002).

Mientras que la severidad es la cantidad de enfermedad que afecta a individuos dentro de una unidad de muestreo (Seem, 1984). Generalmente se evalúa mediante la cuantificación nominal, ordinal o de razón, de los síntomas visibles a criterio de un evaluador; también es conocido el método de evaluación por sensores (Bock et al., 2022).

### 1.5.13. Dasometría

La palabra dasometría proviene de los vocablos griegos *daso* (bosque) y *metrum* (medida); por tanto, se entiende como la ciencia encargada de medir y cuantificar los componentes del bosque. En literatura especializada se han utilizado como sinónimo los términos dendrometría, silvimetría y mensura forestal (Imaña-Encinas 2011).

**Tabla 3**

*Descripción de Variables Dasométricas Comunes*

| Variable dasométrica          | Descripción   |   |
|-------------------------------|---|---|
| <b>Altura<sup>a</sup></b>     | <b>Altura total</b>                                 | Longitud desde el suelo hasta el ápice de la copa.  |
|                               | <b>Altura del fuste</b>                             | Longitud desde el suelo hasta la base de la copa.   |
|                               | <b>Altura de copa</b>                               | Diferencia entre la altura total y la altura del fuste.   |
|                               | <b>Altura comercial</b>                             | Dimensión en altura aprovechable comercialmente, está limitada por el diámetro en la parte superior, nudos, ramas o defectos.   |
| <b>Área basal<sup>b</sup></b> | <b>Diámetro a la altura de pecho (D.A.P.)</b>       | Diámetro del fuste del árbol a la altura de 1,3 m desde suelo. El D.A.P. se utiliza para calcular el área basal a partir de la siguiente fórmula: $G = \pi \times \left(\frac{DAP}{2}\right)^2$ .               |
|                               | <b>Circunferencia a la altura de pecho (C.A.P.)</b> | Circunferencia del fuste del árbol a la altura de 1,3 m desde suelo. El área basal se calcula a partir de la siguiente fórmula: $G = \frac{CAP^2}{4\pi}$ .  |
| <b>Copa<sup>c</sup></b>       | <b>Diámetro de la copa</b>                          | Medida de la proyección horizontal de la copa sobre el suelo, usualmente medida en dos direcciones perpendiculares. El interés está en deducir el área de la proyección de la copa, suponiendo que es circular. |

*Nota.* a: basado en López et al. (2003), b: basado en Lema (1979), c: basado en Imaña-Encinas (2011).

La dasometría comprende el estudio y la medición de diversos aspectos mensurables tanto en los árboles individuales como en las masas forestales, tales como la forma del fuste, la altura, los diámetros, el espesor de corteza, la edad, el volumen, el crecimiento, la producción y las dimensiones de la copa (Tabla 3), entre otros (Izco & Ariz, 2003).

Estas mediciones constituyen un componente esencial en los estudios forestales, ya que permiten analizar la estructura, crecimiento y productividad de los árboles, así mismo, se abre la posibilidad de explorar su relación con factores ecológicos y fitosanitarios (Lema, 1979; Loewe-Muñoz et al., 2024; Solla et al., 2005).

#### **1.5.14. Caracterización Morfológica y Molecular de Hongos**

La caracterización de hongos con fines taxonómicos requiere un enfoque integrado que considere características genotípicas, fenotípicas y fisiológicas (Senanayake, 2020).

La identificación morfológica incluye la recolección de especímenes, su examen macroscópico y microscópico, la documentación fotográfica y la descripción detallada de estructuras relevantes. Sin embargo, la morfología por sí sola puede ser insuficiente para diferenciar especies, debido a la alta plasticidad fenotípica, la presencia de especies crípticas, la existencia de diferentes morfos dentro de un mismo taxón, el pleomorfismo y la homoplasia (Senanayake et al., 2020).

La caracterización molecular por su lado, proporciona un método objetivo y estable que permite discriminar entre especies y cepas aun cuando las características morfológicas varían (Borman et al., 2008). Entre las herramientas moleculares más

utilizadas se encuentran los genes que codifican el ARN ribosómico (rRNA), los cuales permiten tanto la identificación de hongos como la construcción de árboles filogenéticos debido a su alta variabilidad y a la presencia de secuencias codificantes para los tres tipos de rRNA (Deacon, 2006). En particular, las regiones ITS (Internal Transcribed Spacer) presentan gran variabilidad y son ampliamente empleadas para diferenciar especies mediante PCR, utilizando cebadores que amplifican la región de 5' a 3', cuyas secuencias se comparan posteriormente con bases de datos de referencia (Deacon, 2006).

## II. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. Diseño de la Investigación y Procesamiento de Datos

La presente investigación tiene un diseño de tipo no experimental, de alcance descriptivo y correlacional con enfoque cuantitativo.

El procesamiento de datos fue llevado a cabo con el programa Microsoft Excel para el orden los datos, QGIS 3.12.1 para análisis de datos geoespaciales y elaboración de mapas, RStudio (v2025.05.1+513) para análisis estadístico e ilustración de gráficos, BioRender (<https://www.biorender.com/>) para la esquematización de la metodología, ImageJ para la biometría de microfotografías y BLAST-NCBI (<https://sky-blast.com/blast/n>) para el alineamiento de secuencias en el análisis bioinformático.

Se determinó la distribución mediante análisis espacial con datos de campo según la función  $L(r)$  y  $L_{cross}(r)$  para evaluar patrones de distribución (Ripley, 1976) y se presentó en gráficos según su incidencia (Van der Plank, 1975), también se graficó la distribución espacial mediante mapas de Interpolación de Distancia Inversa Ponderada (IDW) (Shepard, 1968), utilizando valores de severidad ponderada calculada en base a principios establecidos (Agrios, 2005; Bock et al., 2022). Y se realizó un gráfico de radar con los datos de orientación de cada individuo para complementar los hallazgos.

La incidencia se relacionó a las variables dasométricas de *P. tarapacana* correspondientes a la altura total, diámetro de fuste, área de la copa y número de fustes. Primero se sometieron las variables al test de Shapiro-Wilk para evaluar su normalidad (Shapiro & Wilk, 1965), luego se aplicó la correlación de Spearman para analizar relaciones entre variables (Spearman, 1904), y con el fin de comparar se aplicó la prueba de Kruskal-Wallis (Kruskal & Wallis, 1952) y prueba de Dunn (Dunn, 1964). Además, se realizó un

Análisis de Componentes Principales (PCA) para explorar patrones multivariados (Jolliffe & Cadima, 2016).

Finalmente, se caracterizó al agente asociado al “nudo negro” mediante muestras colectadas, para lo cual se realizaron observaciones en microscopio y estereocopio, y se realizó la medición de las estructuras fúngicas. Finalmente, para su caracterización molecular se alineó su región ITS en la base de secuencias BLASTn.

## **2.2. Población y Muestra**

### **2.2.1. Población**

La población del estudio fueron los bosques de *Polylepis tarapacana* del departamento de Tacna, con un área total de 128,940,000 m<sup>2</sup> (Franco et al., 2021).

### **2.2.2. Muestra**

La muestra estuvo constituida por 23 parcelas circulares, de las cuales 3 parcelas tuvieron un radio de 20 metros y 20 parcelas tuvieron un radio de 10 metros. Las parcelas estuvieron distribuidas en los bosques de *Polylepis tarapacana* del departamento de Tacna, abarcando las provincias de Tacna y Tarata, en los distritos de Palca, Ticaco y Tarata. El área total muestreada fue de 9,728.96 m<sup>2</sup>, y estuvo limitada por la accesibilidad geográfica y condiciones climáticas adversas. La representatividad de los datos obtenidos se manifiesta en la heterogeneidad de datos obtenidos en alineación con los objetivos del estudio.

## **2.3. Área de Estudio**

La investigación se desarrolló en los bosques de *P. tarapacana* del Altiplano de los Andes del departamento de Tacna (Anexo E), específicamente dentro de las provincias de Tacna y Tarata, distritos de Palca, Ticaco y Tarata. Geográficamente, los bosques de *P.*

*tarapacana* limitan por el este con la República de Bolivia, por el sur con la República de Chile y por norte con el departamento de Puno.

Climatológicamente, mantienen una temporalidad bien marcada con una estación seca que va del mes de abril a noviembre, y una estación húmeda que va de diciembre a marzo, régimen típico de los Andes Centrales (Imfeld et al., 2021).

Además, de acuerdo a Castro et al. (2021) los bosques de *P. tarapacana* en el departamento de Tacna tienen dos zonas climáticas categorizadas según el método de Clasificación Climática de Warren Thornthwaite; una de ellas es semiseca con otoño e invierno secos y frígido, con temperatura máxima entre 9°C a 13°C, temperatura mínima entre -15 a -9 °C, y precipitación de 50 mm a 160 mm aproximadamente. La otra zona presenta un clima semiseco con invierno seco y semifrígido, con temperatura máxima entre 11°C a 15°C y mínimos de -11°C a -7°C, con precipitación anual entre los 500 mm a los 700 mm aproximadamente. Sin embargo, la humedad del suelo mantiene valores muy bajos (0,18 – 0,44 kg/m<sup>2</sup> por día) según NASA Langley Research Center (2024), señalando un suelo con alta aridez o poca retención hídrica. Además, la humedad relativa es moderadamente alta llegando hasta 77,36% en temporada húmeda, mientras que en la temporada seca es muy baja, con un mínimo de 10,6%.

Por otro lado, en condiciones de nubosidad parcial, hay niveles de radiación UV moderados a altos de hasta 5,96; principalmente en la temporada húmeda.

Y los vientos son de baja a moderada velocidad, con un mínimo de 1,12 m/s y un máximo de 7,43 m/s, predominando el rango de 2 a 4 m/s, con dirección primordialmente hacia el sur oeste y norte.

**2.4. Determinación de la Incidencia y Severidad del “nudo negro” de la Queñoa (*P. tarapacana*) en el Departamento de Tacna**

Para calcular la incidencia del “nudo negro”, se contabilizó el número de árboles con presencia del “nudo negro” y el total de árboles dentro de las parcelas muestreadas (Figura 3) y se aplicó la fórmula (Van der Plank, 1975):

$$I\% = \frac{N^{\circ} \text{ de árboles con "nudo negro"}}{N^{\circ} \text{ total de árboles en la parcela}} \times 100$$

Seguidamente, se clasificaron las parcelas en cuatro grupos según su porcentaje de incidencia (Tabla 4) para una mejor interpretación de los datos.

**Tabla 4**

*Clasificación de Parcelas según su Incidencia*

| <b>Porcentaje de Incidencia de la Parcela (%)</b> | <b>Clasificación</b> |
|---|----------------------|
| 0   | Sin Incidencia       |
| > 0 - ≤ 33,33                                     | Incidencia Baja      |
| > 33,33 - ≤ 66,66                                 | Incidencia Media     |
| > 66,66 - ≤ 100                                   | Incidencia Alta      |

Por otra parte, el cálculo de la severidad consideró la integración de los síntomas y signos característicos: necrosis, defoliación, amarillamiento y presencia del “nudo negro”. A cada componente se le asignó un porcentaje visual según recomendaciones de Bock et al. (2022) y se integraron mediante el índice de severidad ponderada, el cual fue construido en base a principios de severidad (Agrios, 2005).

$$S_p(\%) = (A_{\%} \times 0.2) + (D_{\%} \times 0.2) + (N_{\%} \times 0.2) + (B_{\%} \times 0.4)$$

Donde  $S_p(\%)$  es la severidad ponderada,  $A_{\%}$  el porcentaje de amarillamiento,  $D_{\%}$  el porcentaje de defoliación,  $N_{\%}$  el porcentaje de necrosis y  $B_{\%}$  porcentaje del signo.

## 2.5. Determinación de la Distribución del “nudo negro” de la queñoa (*P. tarapacana*) en el Departamento de Tacna

Se determinó si la distribución del “nudo negro” en *P. tarapacana* seguía un patrón aleatorio o agrupado. Para ello, dentro de cada parcela estudiada, se marcó la ubicación de todos los árboles de *Polylepis tarapacana* con un GPS a la vez que se diferenció como árboles con o sin “nudo negro”. Y en base en la función K de Ripley representada como  $K(r)$ , que analiza puntos espaciales al cuantificar qué tan agrupados o dispersos se encuentran según su distancia (Ripley, 1976), se aplicó su función lineal transformada univariada  $L(r)$  y bivariada  $L_{cross}(r)$  (Besag, 1977; Lotwick & Silverman, 1982):

$$K(r) = \frac{A}{n^2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1, j \neq i}^n I_{ij}(r); L(r) = \sqrt{\frac{K(r)}{\pi}} - r; L_{cross}(r) = \sqrt{\frac{K_{cross}(r)}{\pi}}$$

Donde A es el área total de estudio, n el número de puntos, r la distancia radial,  $I_{ij}(r)$  es la función indicadora que toma valor 1 si la distancia entre los puntos i y j  $\leq r$ , y toma valor 0 si la distancia es r.

Y los resultados se interpretaron de la siguiente manera:

- Si  $K(r), L(r), L_{cross}(r) = 0$ : patrón aleatorio a distancia r
- Si  $K(r), L(r), L_{cross}(r) > 0$ : patrón agrupado a distancia r
- Si  $K(r), L(r) < 0$ : patrón uniforme a distancia r;  $L_{cross}(r) < 0$ : repulsión

La variable de presencia del “nudo negro” se codificó con valores binarios: 1 = presencia del “nudo negro”, 0 = ausencia del “nudo negro”, y se organizó junto con las coordenadas espaciales en Microsoft Excel. Luego los datos se importaron a RStudio, donde se utilizó el paquete *spatstat* para calcular tanto la función univariada  $L(r)$ , como la multivariada  $L_{cross}(r)$ , y para su representación gráfica se organizaron los resultados según la clasificación de incidencia por parcela (Tabla 4).

También, se elaboró en un gráfico tipo radar en donde se presentó la orientación (aspecto) de los individuos de *P. tarapcana* agrupados según su clasificación de incidencia (Tabla 4). El análisis se llevó a cabo en RStudio; donde los valores de orientación (en grados) de cada árbol se dividieron en 16 partes iguales (cada 22,5°), para representar los distintos puntos cardinales. Y se agruparon en 8 categorías principales: Norte (N), Noreste (NE), Este (E), Sureste (SE), Sur (S), Suroeste (SO), Oeste (O) y Noroeste (NO). Finalmente, se elaboró el gráfico tipo radar para visualizar la orientación de *P. tarapcana* según cada nivel de incidencia con la función *radarchart()* del paquete *fmsb*.

Además, se aplicó el método de Interpolación por Distancia Inversa Ponderada (IDW, del inglés *Inverse Distance Weighting*); el cual estima los valores de una variable en ubicaciones no muestreadas utilizando datos de puntos conocidos al asignar mayor peso a los valores más próximos al punto muestreado que sirve como referencia (Shepard, 1968); utilizando los valores de severidad ponderada para la visualización de los patrones espaciales de la enfermedad y diferenciación de los árboles infectados, sanos y muertos. La interpolación por IDW el valor estimado en un punto  $x_0$  se calculó mediante:

$$\hat{z}(x_0) = \frac{\sum_{i=1}^n w_i(x_0)Z(x_i)}{\sum_{i=1}^n w_i(x_0)}, w_i(x_0): w_i(x_0) = \frac{1}{d(x_0, x_i)^p}$$

Donde  $Z(x_i)$  es el valor medio en el punto  $i$ ,  $d(x_0, x_i)$  la distancia entre el punto a estimar y el punto muestreado,  $n$  el número de puntos considerados en la interpolación y  $p$  el parámetro de influencia de los puntos cercanos.

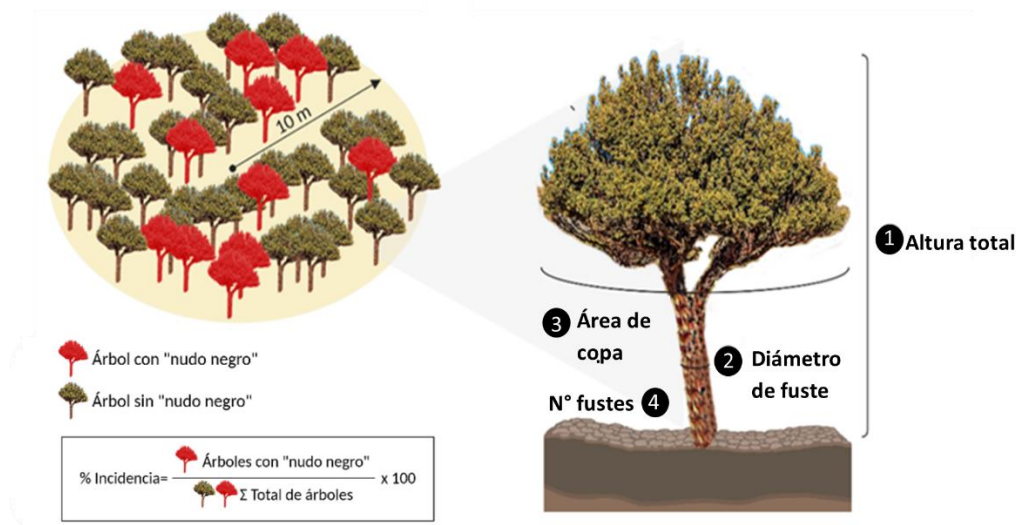
El proceso se realizó en QGIS 3.12.1 mediante la *función de Interpolación IDW*, con un coeficiente  $P$  de distancia 2,0. Para ello, se ingresaron las coordenadas de cada individuo registradas en campo junto a sus respectivos valores de severidad ponderada. El producto fue una capa ráster que se recortó según el área de cada parcela en formato TIFF, el cual se graficó con la librería *ggplot2* en RStudio.

**2.6. Relación entre la Incidencia del “nudo negro” de la Queñoa (*P. tarapacana*) y la Estructura Dasométrica de *Polylepis tarapacana* en el Departamento de Tacna**

Se colectaron datos de la estructura dasométrica de *P. tarapacana* en campo (Figura 3) mediante medición manual utilizando cinta métrica, vernier y wincha. Se registró la altura total (cm), el D.A.P. (cm), el diámetro de copa (cm<sup>2</sup>) y el número de fustes de cada árbol dentro de las parcelas estudiadas. Posteriormente, los datos fueron ordenados en una hoja en Microsoft Excel y se graficaron en RStudio con la herramienta *hist()*.

**Figura 3**

*Determinación de la Incidencia y Colección de Datos de la Estructura Dasométrica*



Seguidamente, se aplicó la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk (Shapiro & Wilk, 1965), para conocer si los datos colectados de la estructura dasométrica siguen una distribución normal:

$$W = \frac{(\sum_{i=1}^n a_i x_{(i)})^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

Donde  $W$  es el estadístico de Shapiro-Wilk,  $n$  el número de observaciones,  $x_{(i)}$  los datos ordenados de menor a mayor (orden estadístico),  $\bar{x}$  la media de los datos y  $a_i$  las constantes.

Y se interpretó según:

- $W$  cerca de 1: los datos siguen una distribución normal
- $H_0$ : los datos siguen una distribución normal
- $H_1$ : los datos no siguen una distribución normal
- valor  $p > 0.05$ : no se rechaza  $H_0$
- valor  $p \leq 0.05$ : se rechaza  $H_0$

Para realizar la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk se utilizó la función `apply()` de RStudio y se aplicó `shapiro.test()` a cada variable numérica. Los valores p de cada prueba se extrajeron con la función `sapply(function(x) x$p.value)`, y se utilizó `for()` para mostrar el estadístico  $W$  y valor-p en conjunto.

Y, para evaluar la relación entre las variables de estructura dasométrica de *P. tarapacana* (altura, diámetro de fuste, copa y número de fustes) y la incidencia; se aplicó la correlación de Spearman y para identificar diferencias entre grupos de incidencia se aplicó la prueba de Kruskal-Wallis.

La correlación de Spearman es una prueba no paramétrica que evalúa la fuerza y dirección de una relación monotónica entre dos variables y no requiere que los datos sigan una distribución normal ni que la relación sea lineal (Spearman, 1904). Cuando no hay empates,  $\rho$  se calcula con la siguiente fórmula:

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum D^2}{N(N^2 - 1)}$$

Donde  $\rho$  es el coeficiente a calcular,  $D$  es la diferencia entre los rangos de cada observación en las dos variables y  $N$  el número de pares de observaciones.

Y se interpretó según:

- $\rho = +1$ : *relación monótonamente creciente perfecta*
- $\rho = -1$ : *relación monótonamente decreciente perfecta*
- $\rho = 0$ : *no hay correlación monotónica*
- $H_0$ : *no hay relación monotónica*
- $H_1$ : *hay relación monotónica*
- *valor  $p > 0.05$ : no se rechaza  $H_0$*
- *valor  $p \leq 0.05$ : se rechaza  $H_0$*

Los análisis de correlación se realizaron en RStudio, empleando la función `rcorr()` del paquete `Hmisc`, la cual calcula automáticamente tanto los coeficientes de correlación ( $\rho$ ) como los valores de significancia estadística (valores  $p$ ). Se utilizó el parámetro `type = "spearman"` para asegurar el uso de correlación no paramétrica. Para la visualización de los resultados, se empleó `ggplot2`, generando un mapa de calor en el que se representaron gráficamente las correlaciones, usando una escala de color continua entre -1 y 1.

Y la prueba de Kruskal-Wallis (Kruskal & Wallis, 1952), prueba no paramétrica, permitió comparar los grupos formados según su clasificación de incidencia para identificar diferencias significativas entre ellos. Se calculó a partir de los rangos de los datos y se define como:

$$H = \frac{12}{N(N+1)} \sum_{i=1}^k \frac{R_i^2}{n_i} - 3(N+1)$$

Donde  $H$  es el estadístico de Kruskal-Wallis,  $N$  el número total de observaciones,  $k$  el número total de grupos,  $n_i$  el número de observaciones en el grupo  $i$  y  $R_i$  la suma de los rangos del grupo  $i$ . Y el valor  $H$  se comparó con una distribución chi-cuadrado ( $\chi^2$ ) con grados de libertad  $k - 1$  para determinar su significancia.

Y se interpretó según:

- *Estadístico  $H$ : indica la magnitud de la diferencia*
- *$H_0$ : todos los grupos tienen la misma distribución*
- *$H_1$ : al menos un grupo difiere de los demás*
- *valor  $p > 0.05$ : no se rechaza  $H_0$*
- *valor  $p \leq 0.05$ : se rechaza  $H_0$*

La prueba se aplicó a las variables de la estructura dasométrica y la variable de clasificación fue el nivel de incidencia, tratada como una variable categórica con niveles previamente definidos (Tabla 4). Los análisis se realizaron en RStudio, utilizando la función `kruskal.test()` de base R, dentro de un bucle que ejecutó la prueba individualmente para cada variable obteniendo como resultado los valores  $p$ . Esto permitió identificar si al menos un grupo del nivel de incidencia difería significativamente del resto en cada variable evaluada.

Y con el objetivo de identificar entre qué niveles de incidencia se presentaban diferencias significativas, se aplicó la prueba post-hoc de Dunn (Dunn, 1964), únicamente para aquellas variables que resultaron significativas en la prueba de Kruskal-Wallis. Se utilizó la función `dunn.test()` con corrección de Holm para el ajuste de los valores de significancia, incluida en el paquete `dunn.test` en RStudio. Además, se generaron diagramas de caja (boxplots) con el paquete `ggplot2`, para representar visualmente las diferencias entre los grupos de incidencia. Y para interpretar los resultados de la prueba

de Dunn se comparó el valor p ajustado por método de Holm. Cuando el valor p ajustado entre un par de grupos es menor a 0.05, se puede decir que hay diferencia estadísticamente significativa entre tales grupos; pero si el valor p ajustado es igual o mayor a 0.05, no existe diferencia significativa.

Finalmente, para explorar patrones entre variables topográficas y los niveles de incidencia, se aplicó un Análisis de Componentes Principales (PCA) (Jolliffe & Cadima, 2016). Las variables topográficas correspondieron a la pendiente, curvatura, elevación, TWI, TPI, exposición norte (1 a -1) y exposición este (1 a -1); y fueron extraídas de un modelo de elevación digital (DEM) ALOS PALSAR de resolución 12,5 m. El análisis se realizó en RStudio, donde se estandarizó las variables morfométricas y la incidencia con la función *scale()* para uniformizar la escala; luego, se usó la función *prcomp()* para calcular los componentes principales. Se utilizaron los dos primeros componentes (PC1 y PC2), ya que juntos explicaron la mayor parte de la variación en los datos. Y para visualizar los resultados, se creó un gráfico biplot con los paquetes *ggplot2*, *ggrepel* y *factoextra*.

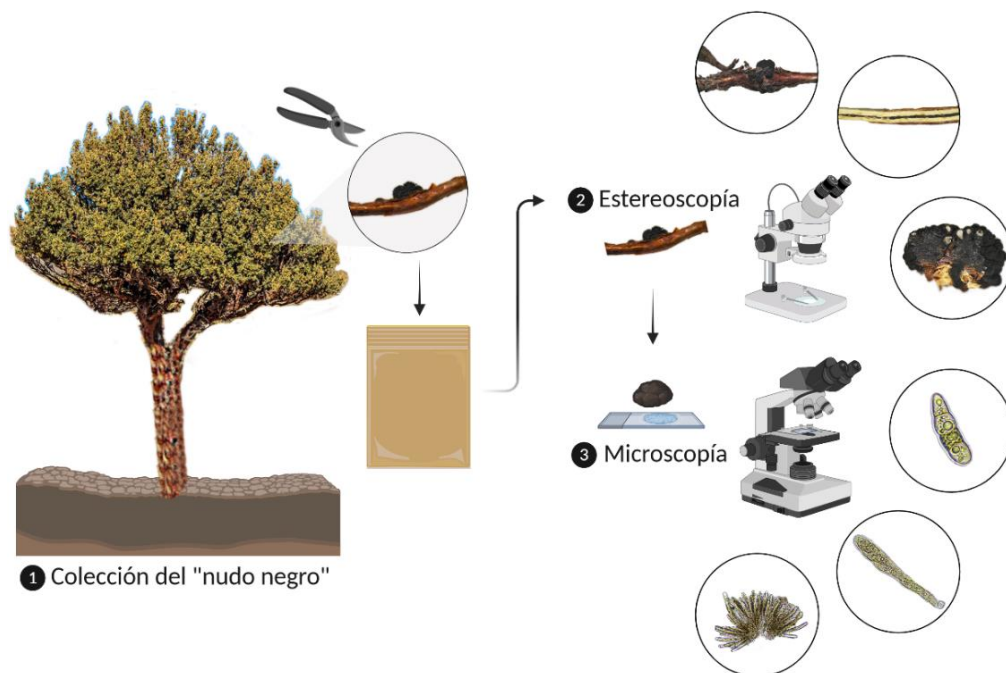
## **2.7. Caracterización Morfológica del Agente Asociado al “nudo negro” de *Polylepis tarapacana***

Para la caracterización morfológica del agente fúngico asociado al “nudo negro” de *P. tarapacana*, se colectaron ramas de 20 cm con signo del “nudo negro” con ayuda de una tijera de podar desinfectada con alcohol al 70° entre cada corte. Las muestras fueron transportadas en bolsas de papel al laboratorio de Botánica de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann para su observación y biometría (Figura 4). Primero, se contabilizaron y midieron los ascomatas por rama en el estereoscopio, se realizaron cortes transversales con ayuda de un bisturí para apreciar la estructura interior,

y se hicieron cortes longitudinales en las ramas para observar el estroma. Luego, para observar las estructuras microscópicas, se realizaron finos cortes del ascomata con bisturí y se dispusieron en preparados en fresco con agua destilada, para la descripción y medición de ascas y ascosporas.

**Figura 4**

*Esquema de la Caracterización Morfológica del “nudo negro”*

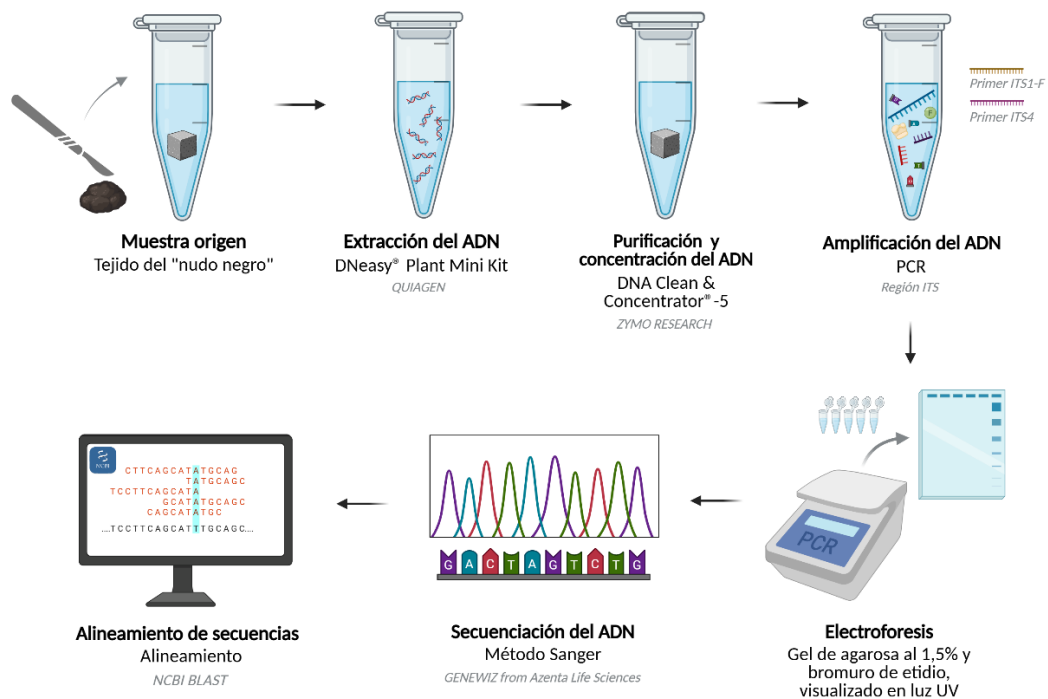


## 2.8. Caracterización Molecular del Agente Asociado al “nudo negro” de *Polylepis tarapacana*

Para la caracterización molecular, se transportaron 6 muestras de aproximadamente 0,6 x 0,6 cm de tejido de “nudo negro” en AP1 buffer de lisis (QIAGEN), al Laboratorio de Micología Quandt (Estados Unidos), donde se llevó a cabo la caracterización molecular (Figura 5).

**Figura 5**

*Esquema de la Caracterización Molecular del "nudo negro"*



- **Extracción, Purificación y Concentración del ADN**

Las muestras fueron disgregadas con un taladro con triturador de tejidos (Tissue grinders). Seguidamente, se realizó la extracción del ADN con el kit DNeasy® Plant Mini Kit (QIAGEN); posteriormente, el ADN fue purificado y concentrado utilizando el kit DNA Clean & Concentrator®-5 (Zymo Research). Se siguió el protocolo del fabricante en ambos casos.

- **Amplificación de la Región ITS**

Se amplificó la región ITS (Internal Transcribed Spacer) del ADN ribosomal, mediante PCR, utilizando los primers ITS1-F (CTTGGTCATTAGAGGAAGTAA) y ITS4 (TCCTCCGCTTATTGATATGC). La mezcla de reacción incluyó 23 µL de master mix de PCR y 2 µL de ADN. La mezcla se sometió a 2 minutos de desnaturalización inicial a 94 °C, seguidos de 30 ciclos de desnaturalización a 94 °C durante 30 segundos, alineamiento a 55 °C

durante 45 segundos y elongación a 72 °C durante 1 minuto, con una extensión final a 72 °C durante 10 minutos; tal como se indica en la metodología de White et al. (1990). Luego, los productos de la amplificación fueron verificados mediante electroforesis en gel de agarosa al 1,5% con bromuro de etidio y visualizados bajo luz UV.

- **Secuenciación Sanger**

Los productos de PCR se enviaron a la empresa GENEWIZ Azenta Life Sciences para su secuenciación mediante el método de Sanger.

- **Análisis Bioinformático**

Las secuencias obtenidas fueron alineadas mediante la herramienta BLASTn (National Center for Biotechnology Information [NCBI]) para determinar el grado de similitud con el banco de datos disponibles.

- **Análisis Filogenético**

Se construyó un árbol filogenético basado en la concatenación de las secuencias de cuatro genes: ITS, LSU, SSU y TEF1. Las secuencias fueron alineadas individualmente y posteriormente concatenadas para construir un conjunto de datos combinado. El árbol filogenético se generó mediante el método de Máxima Verosimilitud (Maximum Likelihood, ML), utilizando los modelos de sustitución de nucleótidos más adecuados para cada partición. El soporte estadístico de las ramas se evaluó mediante análisis de bootstrap, considerando como valores significativos aquellos  $\geq 70\%$ .

El proceso de caracterización y análisis molecular se llevó a cabo en colaboración con la Phd. St. Mary Childress del Laboratorio de Micología Quandt de la Universidad de Colorado Boulder.

Y todo el trabajo de campo se realizó conforme a las disposiciones legales vigentes para la investigación científica de flora silvestre, con estudios moleculares, fuera de áreas

naturales protegidas. Para la ejecución del estudio se contó con la autorización correspondiente otorgada por el Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre (SERFOR), mediante RD-000018-2025-DGGSPFFS-DGSPF y su modificación RD-000025-2025-DGGSPFFS-DGSPF (Anexo D).

### III. RESULTADOS

#### 2.9. Determinación de la Incidencia y Severidad del “nudo negro” de la Queñoa (*P. tarapacana*) en el Departamento de Tacna

El resultado obtenido para la incidencia de todos los individuos muestreados es de 32,33%. Pues el total de individuos contemplados para el cálculo de la incidencia fue de 1565, donde 506 presentaron el “nudo negro”. Y en cuanto a las parcelas delimitadas, 18 de las 23 parcelas evaluadas mostraron la presencia de individuos afectados.

El análisis de la incidencia por parcela (Tabla 5) permitió clasificar las unidades de muestreo en cuatro categorías (Figura 6):

- 4 parcelas con Incidencia Alta (>66,66% a  $\leq$  100%)
- 6 parcelas con Incidencia Media (> 33,33% y  $\leq$  66,66 %)
- 8 parcelas con Incidencia Baja (1% a  $\leq$  33,33%)
- 5 parcelas Sin Incidencia (0%)

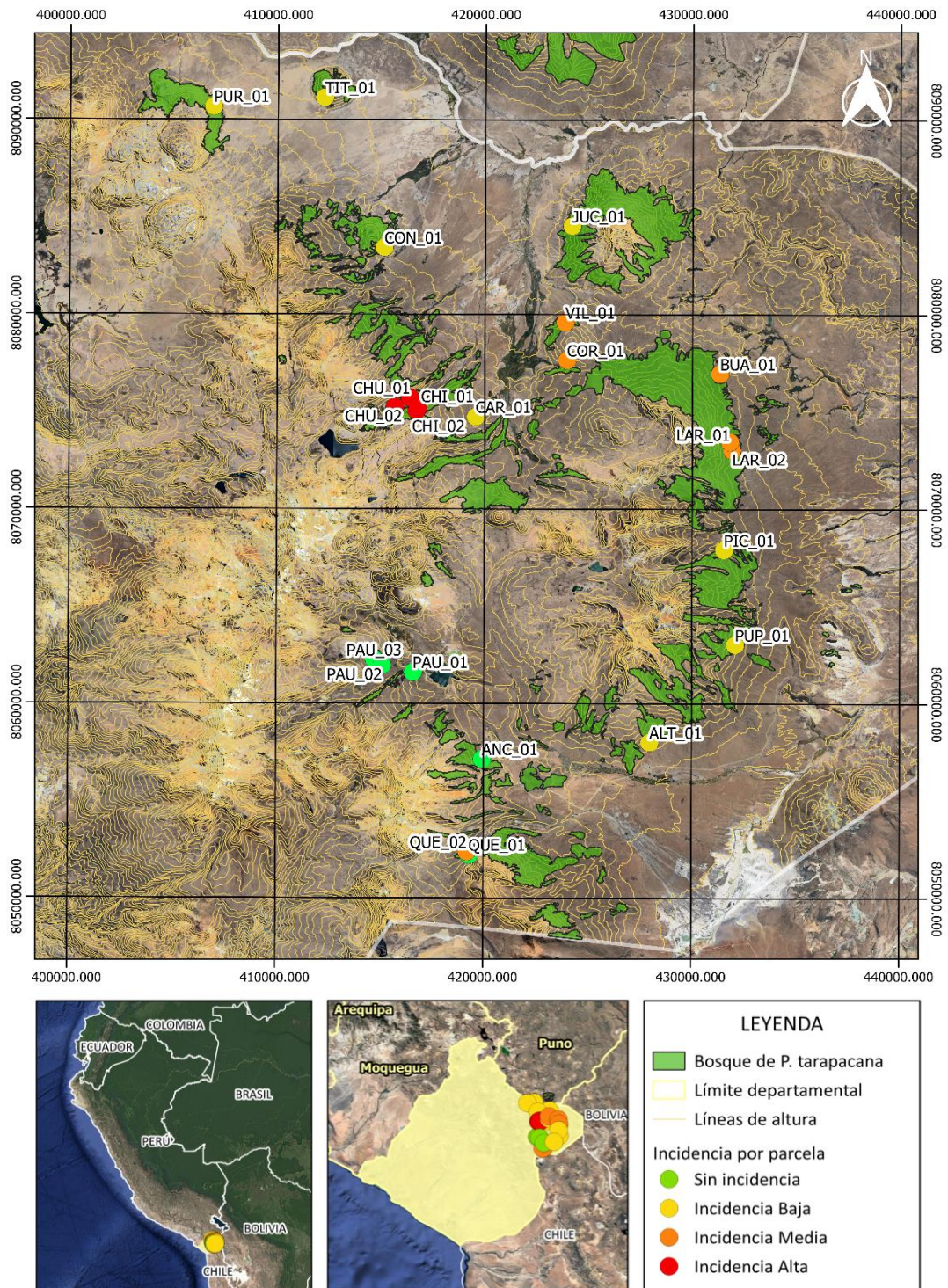
Entre los resultados de incidencia por parcela, resaltó CHI\_1 con el mayor porcentaje de incidencia, el cual fue de 95,56%, donde solo existieron 2 árboles sanos de un total de 45. Y no muy alejado, CHU\_2 tuvo una incidencia de 82,81%; con 11 árboles con “nudo negro” de un total de 64 individuos.

En general, se encontraron parcelas con variados porcentajes de incidencia, lo cual brindó una buena fuente de datos para los análisis posteriores.

Por otro lado, los resultados del cálculo de la severidad ponderada llegaron hasta 73.4% en un individuo de LAR\_01 (LAR\_01\_54), y tuvo 43% de ascomata en sus ramas, seguido de 65,4% en CHU\_01 (CHU\_01\_15, 36% ascomata) y 63,4% en LAR\_02 (LAR\_02\_55, 13% de ascomata).

**Figura 6**

*Mapa de Distribución e Incidencia del "nudo negro" de P. tarapacana*



**Tabla 5***Resultados de Incidencia por Parcela*

| <b>Código de la parcela</b> | <b>Coordenadas</b> |             | <b>Código de la parcela</b> | <b>Cantidad de árboles con "nudo negro"</b> | <b>*Total de árboles</b> | <b>Porcentaje de incidencia (%)</b> | <b>Clasificación según incidencia</b> |
|-----------------------------|--------------------|-------------|-----------------------------|---|--------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|
|                             | <b>x</b>           | <b>y</b>    |                             |   |                          |                                     |                                       |
| ANC_01                      | 419925.349         | 8057140.731 | 153                         | 0   | 153                      | 0                                   | Sin incidencia                        |
| QUE_01                      | 419305.01          | 8052222.672 | 148                         | 0   | 148                      | 0                                   | Sin incidencia                        |
| PAU_01                      | 416588.852         | 8061608.141 | 33                          | 0   | 33                       | 0                                   | Sin incidencia                        |
| PAU_02                      | 415093.629         | 8061963.629 | 41                          | 0   | 41                       | 0                                   | Sin incidencia                        |
| PAU_03                      | 414726.204         | 8062240.982 | 50                          | 0   | 52                       | 0                                   | Sin incidencia                        |
| TIT_01                      | 412244.264         | 8091134.262 | 44                          | 5   | 49                       | 10,20                               | Incidencia Baja                       |
| PUR_01                      | 406899.922         | 8090667.387 | 60                          | 11  | 71                       | 15,49                               | Incidencia Baja                       |
| ALT_01                      | 427979.214         | 8058003.932 | 74                          | 15  | 89                       | 16,85                               | Incidencia Baja                       |
| PIC_01                      | 431536.478         | 8067898.727 | 50                          | 13  | 63                       | 20,63                               | Incidencia Baja                       |
| PUP_01                      | 432086.004         | 8063028.669 | 56                          | 16  | 72                       | 22,22                               | Incidencia Baja                       |
| JUC_01                      | 424186.339         | 8084548.231 | 32                          | 11  | 43                       | 25,58                               | Incidencia Baja                       |
| CON_01                      | 415141.068         | 8083430.842 | 40                          | 15  | 55                       | 27,27                               | Incidencia Baja                       |
| CAR_01                      | 419567.831         | 8074730.684 | 43                          | 17  | 60                       | 28,33                               | Incidencia Baja                       |

**Tabla 5** (Continuación)*Resultados de Incidencia por Parcela*

| <b>Código de la parcela</b> | <b>Coordenadas</b> |             | <b>Código de la parcela</b> | <b>Cantidad de árboles con “nudo negro”</b> | <b>*Total de árboles</b> | <b>Porcentaje de incidencia (%)</b> | <b>Clasificación según incidencia</b> |
|-----------------------------|--------------------|-------------|-----------------------------|---|--------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|
|                             | <b>x</b>           | <b>y</b>    |                             |   |                          |                                     |                                       |
| QUE_02                      | 419212.177         | 8052373.196 | 49                          | 32  | 81                       | 39,51                               | Incidencia Media                      |
| COR_01                      | 423956.547         | 8077649.859 | 28                          | 19  | 47                       | 40,43                               | Incidencia Media                      |
| BUA_01                      | 431323.886         | 8076955.176 | 17                          | 22  | 39                       | 56,41                               | Incidencia Media                      |
| VIL_01                      | 423869.616         | 8079593.776 | 36                          | 48  | 84                       | 57,14                               | Incidencia Media                      |
| LAR_01                      | 431810.535         | 8073458.172 | 34                          | 51  | 85                       | 60                                  | Incidencia Media                      |
| LAR_02                      | 431914.217         | 8073031.681 | 29                          | 58  | 87                       | 66,67                               | Incidencia Media                      |
| CHU_01                      | 416407.08          | 8075711.5   | 13                          | 30  | 43                       | 69,77                               | Incidencia Alta                       |
| CHI_02                      | 416711.553         | 8075040.265 | 14                          | 47  | 61                       | 77,05                               | Incidencia Alta                       |
| CHU_02                      | 415668.808         | 8075239.514 | 11                          | 53  | 64                       | 82,81                               | Incidencia Alta                       |
| CHI_01                      | 416777.3           | 8075223     | 2                           | 43  | 45                       | 95,56                               | Incidencia Alta                       |

*Nota.* \*La información completa de la matriz de datos se encuentra en el Anexo A.

Por otro lado, los resultados del cálculo de la severidad ponderada llegaron hasta 73.4% en un individuo de LAR\_01 (LAR\_01\_54), y tuvo 43% de ascomata en sus ramas, seguido de 65,4% en CHU\_01 (CHU\_01\_15, 36% ascomata) y 63,4% en LAR\_02 (LAR\_02\_55, 13% de ascomata).

### **3.1. Determinación de la Distribución del “nudo negro” de la Queñoa (*P. tarapacana*) en el Departamento de Tacna**

Los resultados del análisis univariado mediante la función L de Ripley para conocer patrones de distribución espacial de *P. tarapacana* sin “nudo negro” o sin incidencia, mostraron que en el grupo “Sin Incidencia”, generalmente las parcelas tienden a agruparse (Figura 7), sugiriendo un patrón natural de *P. tarapacana* a la agrupación, donde pueden existir factores que influyan su organización, pues la presencia del “nudo negro” no interviene.

Por otro lado, y para el análisis bivariado mediante la función L cruzada de Ripley para analizar los patrones de distribución de entre individuos con y sin presencia del “nudo negro” en las parcelas con “incidencia baja”, “incidencia media” e “incidencia alta”, se encontró lo descrito a continuación.

Los árboles con “nudo negro” del grupo de “Incidencia Baja” tienden a mayormente agruparse con aquellos sin “nudo negro”; con algunas excepciones (TIT\_01, PUP\_01 y JUC\_01) que tienden a la exclusión y CON\_01 que se alinea con la aleatoriedad.

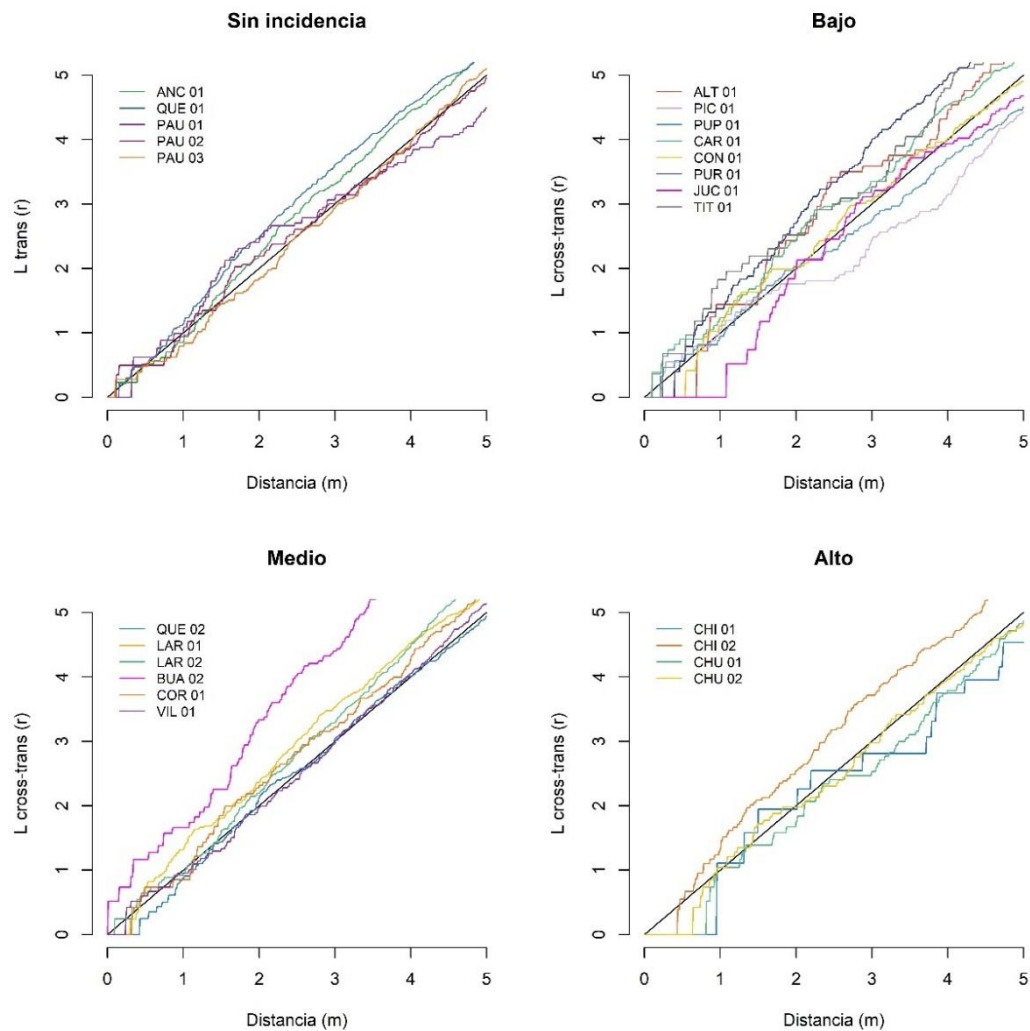
Las parcelas de “Incidencia Media” guardan mejor ubicación en el patrón de agrupación, resaltando BUA\_02 que presenta la tendencia más marcada hacia la agrupación; y solo VIL\_01 y LAR\_01 con tendencia al patrón aleatorio.

Y por su parte, entre las parcelas de “Incidencia Alta” se encontraron los tres casos. Donde las parcelas CHU\_01 y CHI\_01 tendieron a la exclusión, CHU\_02 a la aleatoriedad y CHI\_02 a la agrupación.

En general, las parcelas con “nudo negro” presentaron patrones de agrupación, especialmente las parcelas BUA\_02, CHI\_02 y PUR\_01.

### Figura 7

Gráficos de la Función L de Ripley según Incidencia



*Nota.* Se presenta la función univariada transformada de K de Ripley (Lest-trans) para la categoría “Sin incidencia”, y la función bivariada transformada de K de Ripley (Lcross-trans) para las demás categorías de incidencia.

Por otro lado, la interpolación IDW permitió graficar los valores de severidad por parcelas de manera que se permite analizar su distribución espacial.

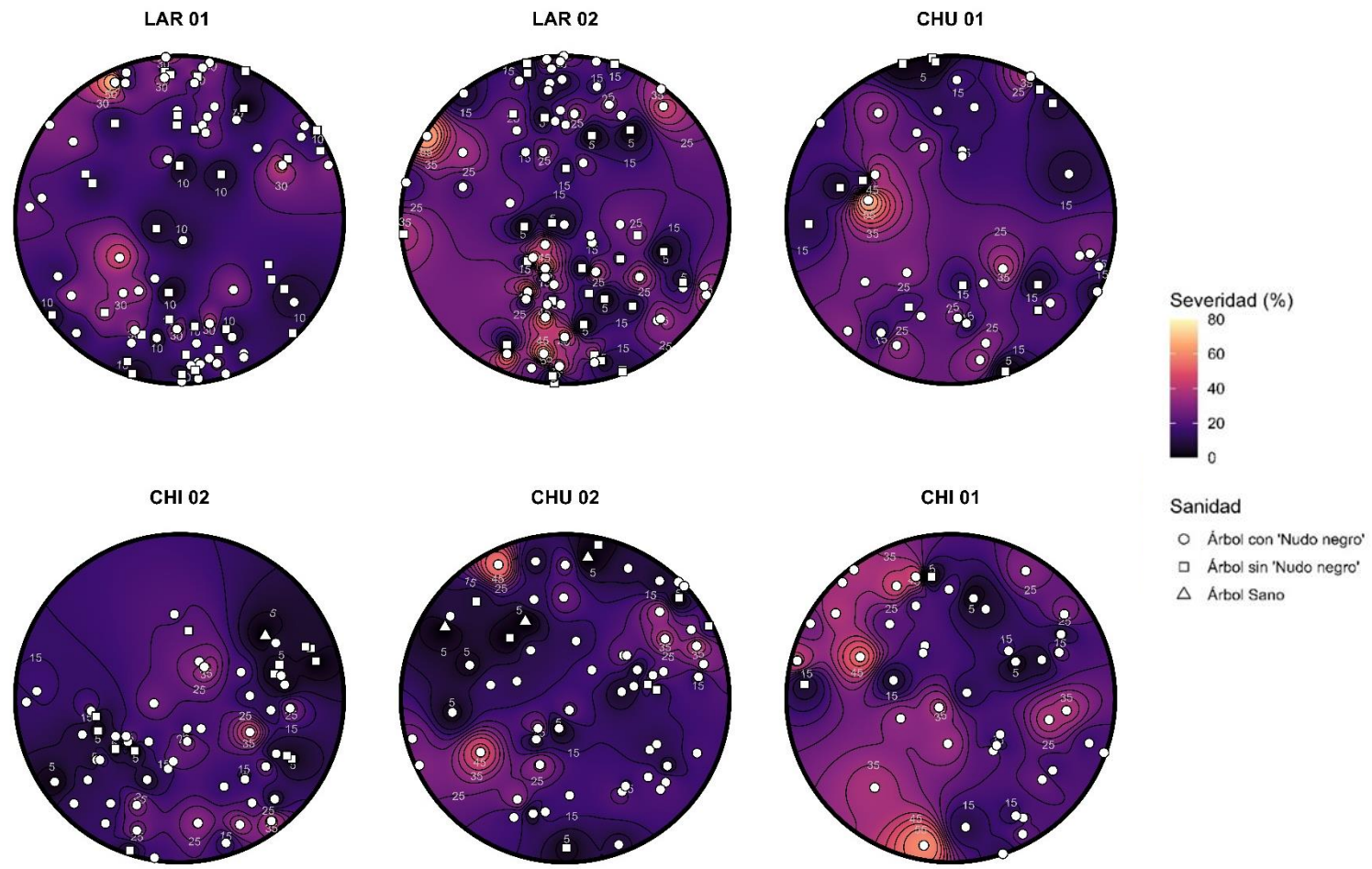
En ese sentido, se halló un mayor porcentaje promedio de severidad ponderada (Anexo A) en las parcelas QUE\_02 (29,08%), ANC\_01 (25,34%), ALT\_01 (25,15%), CHI\_01 (25,12%), LAR\_02 (24,84%) y CHU\_01 (21,87%), valores que resaltan en los mapas de interpolación IDW (Figura 8) con coloración amarillenta, a diferencia de CAR\_01 (8,56%), PAU\_02 (9,07%), PUR\_01 (11,22%) Y TIT\_01 (11,29%) que tienen los valores más bajos, bien representados en el gráfico con coloración morado oscuro.

Entre las parcelas con mayor severidad, podemos encontrar a ANC\_01 y ALT\_01, resaltando el hecho que estas parcelas tiene un 0% de incidencia del “nudo negro” (Tabla 5). Sin embargo, aún conserva un alto porcentaje de severidad ponderada. Esto se explica en que el cálculo de la severidad considera a los síntomas de la enfermedad (amarillamiento, defoliación y necrosis) además del signo (nudos negros); es así que los síntomas pueden también ser causados por otros factores como disponibilidad de agua, tipo de suelo, otra enfermedad, etc.

Por otra parte, los gráficos de interpolación IDW permitieron analizar con mayor detalle la distribución de los árboles con y sin “nudo negro”. Por ejemplo, en la parte superior derecha de la parcela CHU\_02 se observan tres árboles afectados muy próximos entre sí, con porcentajes de enfermedad similares, además, se observan varios grupos de árboles con “nudo negro” agrupados. En el extremo derecho central de la parcela QUE\_02, se aprecia la proximidad de dos árboles con alta severidad y presencia del “nudo negro”, mientras que un árbol sin la enfermedad se encuentra entre ellos, lo que podría indicar un riesgo de contagio próximo.

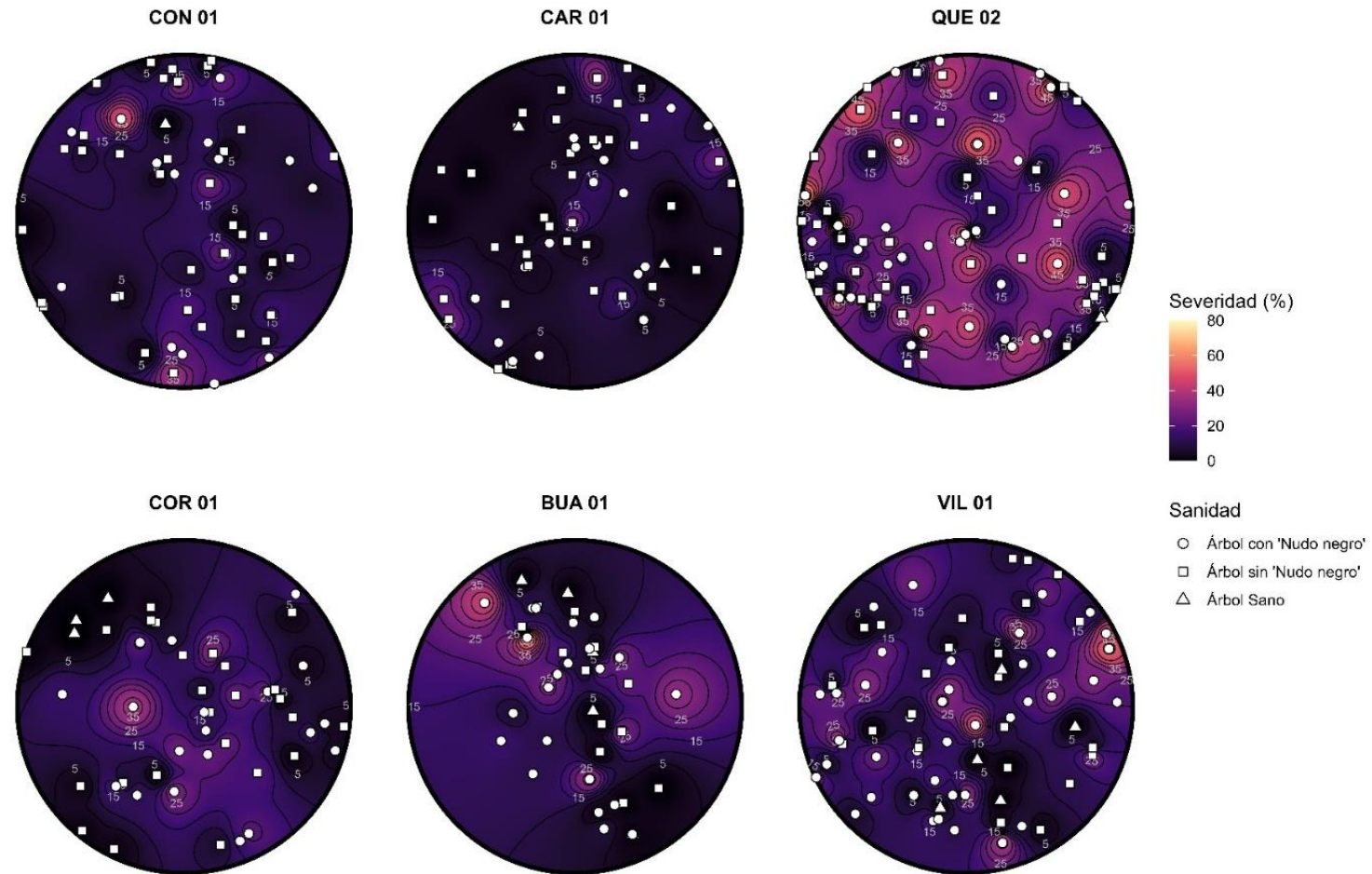
**Figura 8**

*Mapa de Interpolación de IDW según la Severidad Ponderada por Parcela*



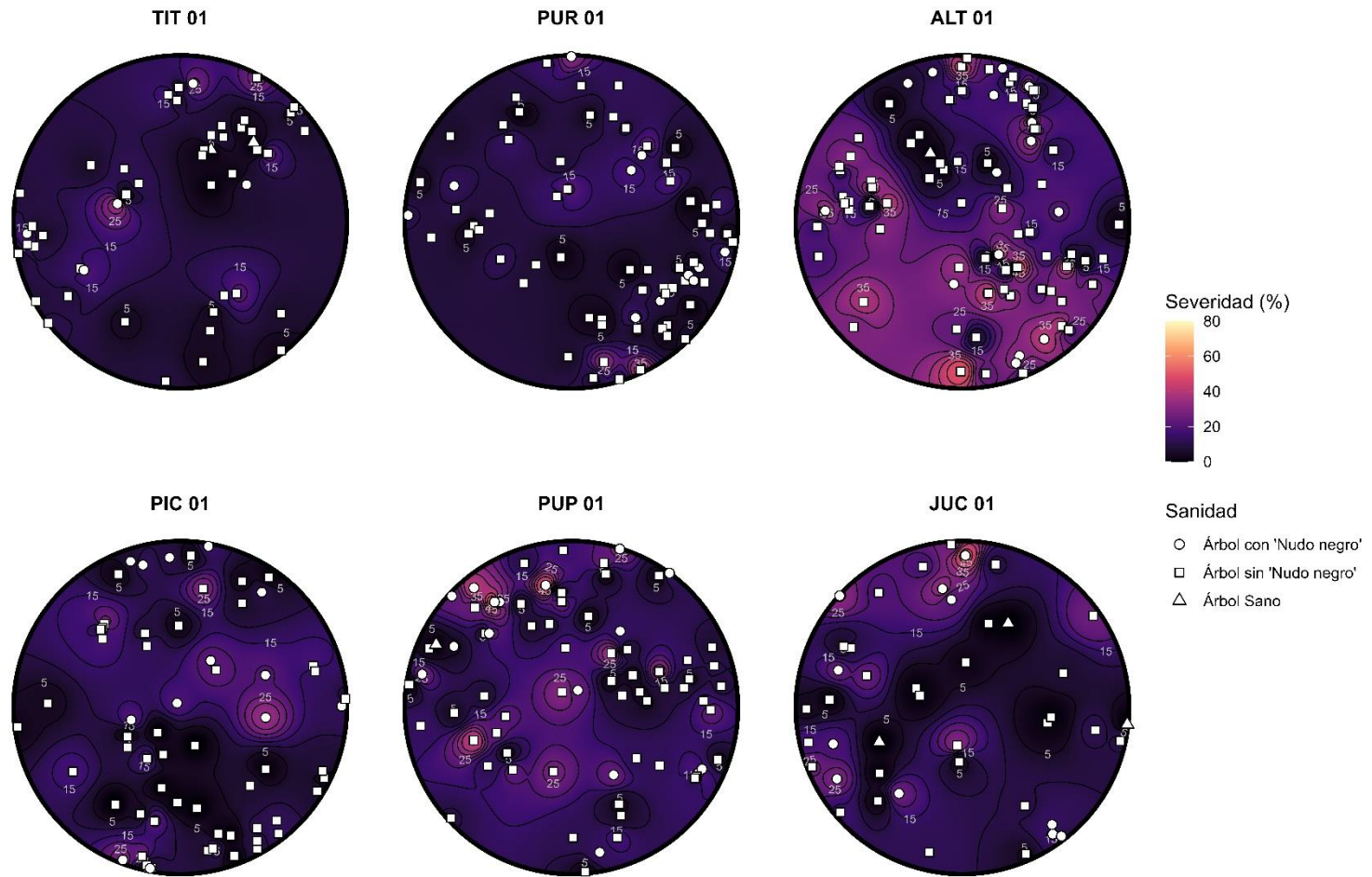
**Figura 8** (Continuación)

*Mapa de Interpolación de IDW según la Severidad Ponderada por Parcela*



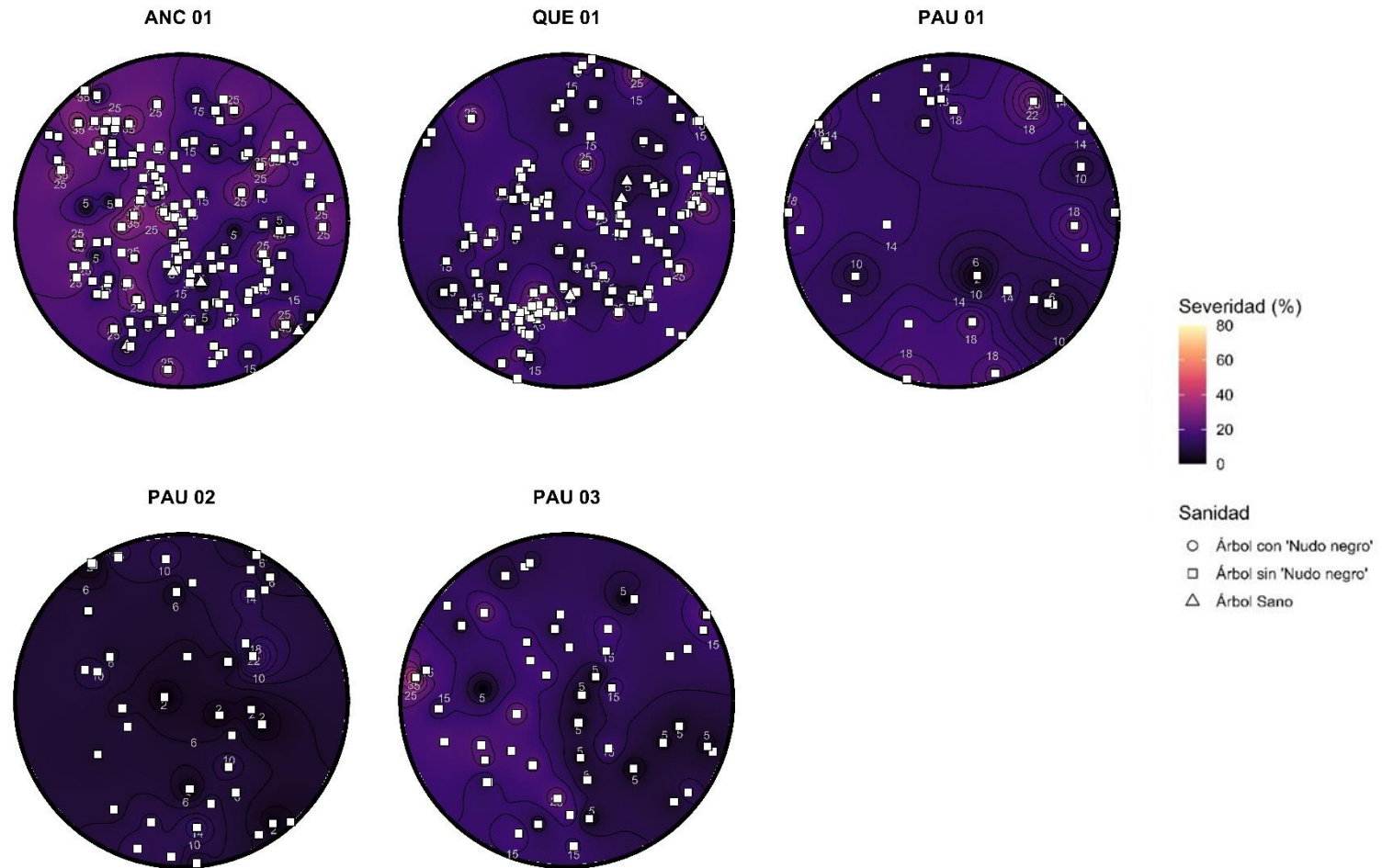
**Figura 8** (Continuación)

*Mapa de Interpolación de IDW según la Severidad Ponderada por Parcela*



**Figura 8** (Continuación)

*Mapa de Interpolación de IDW según la Severidad Ponderada por Parcela*

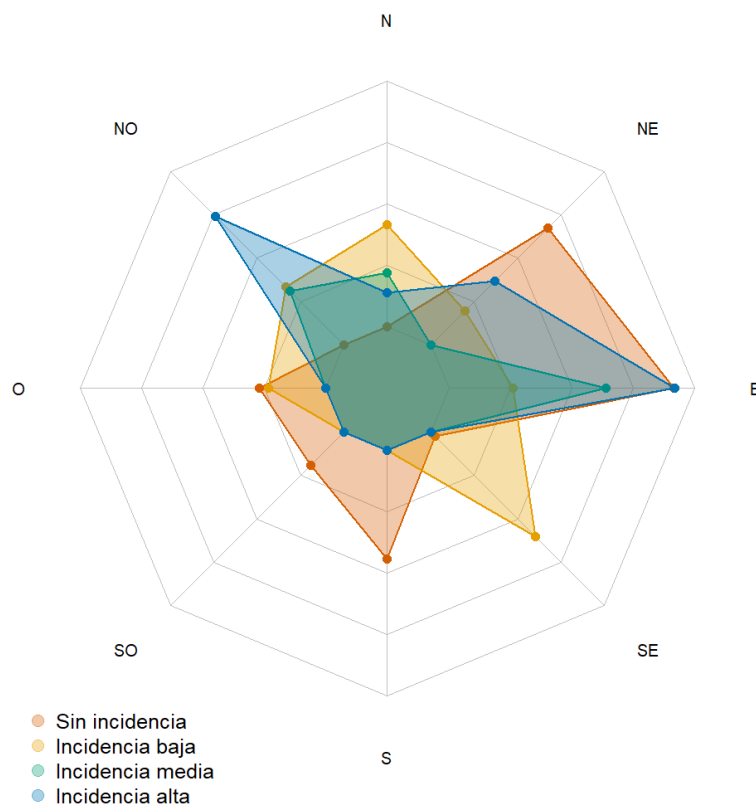




Por otra parte, los resultados integrados de la orientación en el gráfico de radar (Figura 9) muestran que *Polylepis tarapacana* presenta una orientación predominante desde el Este (E) hasta el Noroeste (NO). Y según la orientación por niveles de incidencia, las parcelas sin incidencia tienen individuos con una distribución relativamente equilibrada, con presencia hacia múltiples direcciones, especialmente hacia el Noreste (NE), Este (E) y Sur (S). Las parcelas con baja incidencia se concentran principalmente hacia el Sureste (SE), y de manera dispersa hacia el Oeste (O), Noroeste (NO) y Norte (N). Por su parte, las parcelas con incidencia media se encuentran más centradas, aunque guarda cierta preferencia hacia el Este (E). Finalmente, las parcelas con incidencia alta presentan una orientación bien definida, con mayor representación en las direcciones Noroeste (NO), Noreste (NE) y Este (E).

**Figura 9**

*Gráfico de Radar de la Orientación según Incidencia*

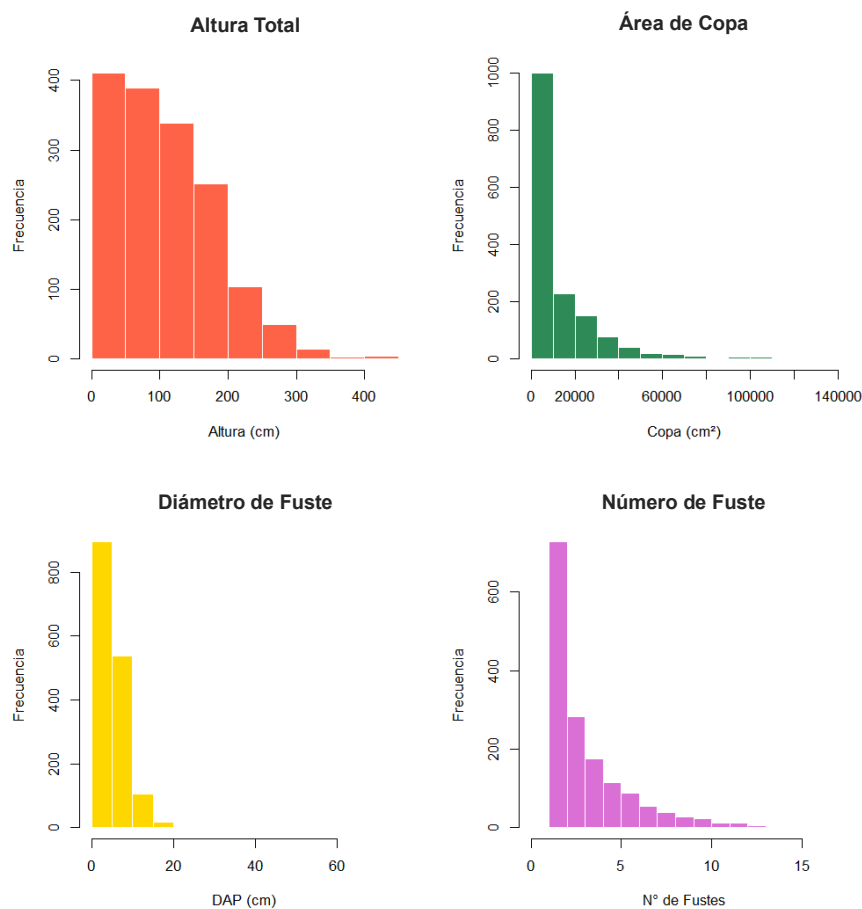


### 3.2. Relación entre la Incidencia del “nudo negro” de la Queñoa (*P. tarapacana*) y la Estructura Dasométrica de *P. tarapacana* en el Departamento de Tacna

Los datos recolectados para las variables de la estructura dasométrica correspondieron a 1588 individuos (Figura 10). Para la altura total, se encontró un mínimo de 3 cm y máximo de 420 cm, aunque la mayoría son más pequeños que 200 cm. Las dimensiones del área de la copa van de 0.42 cm<sup>2</sup> a 134303.4 cm<sup>2</sup>, pero en general, la copa es menor a 1000 cm<sup>2</sup>. En cuanto al diámetro de fuste, esencialmente va de 0,06 a 20 cm, y solo un individuo presentó el máximo de 71 cm. Y el número de fustes máximo fue de 17 por planta.

**Figura 10**

*Histogramas de los Datos de Variables Dasométricas*



Los resultados de las variables dasométricas y la incidencia fueron sometidas a la prueba de Shapiro-Wilk (Tabla 6). Y se halló que las variables de estructura dasométrica rechazaron la hipótesis nula de normalidad ( $p < 0.05$ ), mientras que solo la incidencia siguió una distribución normal ( $p > 0.05$ ). Entonces, dado que se requiere analizar la incidencia respecto a las demás variables, se aplicaron pruebas no paramétricas.

**Tabla 6**

*Resultados de la Prueba de Shapiro-Wilk*

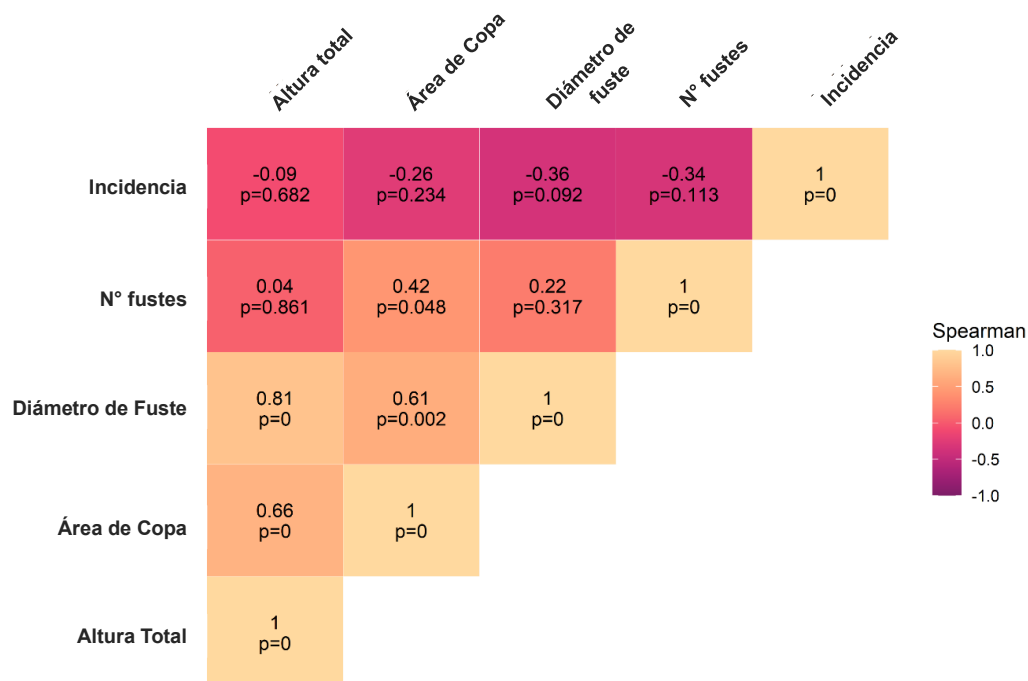
| Variable          | Valor W | Valor-p      |
|-------------------|---------|--------------|
| Incidencia        | 0.92015 | 0.06711683   |
| Altura total      | 0.94396 | 7.012026e-24 |
| Área de copa      | 0.67595 | 1.652458e-47 |
| Diámetro de fuste | 0.76242 | 1.027665e-42 |
| Número de fustes  | 0.83313 | 1.401766e-37 |

Primero, tras relacionar variables dasométricas e incidencia mediante la correlación de Spearman (Figura 11), se identificaron correlaciones positivas significativas entre la altura total, área de copa y diámetro de fuste; es decir, que aquellos árboles más altos tienen copas más grandes y troncos más anchos. También existió correlación moderada entre el diámetro de fuste y número de fustes.

En cuanto a la incidencia, no se encontraron correlaciones estadísticamente significativas con variables dasométricas evaluadas. Aunque se observó una correlación negativa moderada con el diámetro de fuste (coeficiente  $\rho = -0,36$ ; valor  $p = 0,092$ ) y el número de fustes (coeficiente  $\rho = -0,34$ , valor  $p = 0,113$ ), ambas no son estadísticamente significativas.

**Figura 11**

*Correlación de Spearman entre Incidencia y Variables Dasométricas*



Luego, para la prueba de Kruskal-Wallis según la clasificación de incidencia como componentes, se revelaron diferencias significativas estadísticamente en los componentes del diámetro de fuste (Tabla 7), pues tuvo un valor p de 0,0361 (menor a 0,05) y con un valor del estadístico H de 8,537.

**Tabla 7**

*Resultados de la Prueba de Kruskal-Wallis*

| Variable                 | Estadístico H | Valor p        |
|--------------------------|---------------|----------------|
| Severidad ponderada      | 6,7656        | 0,07976        |
| Altura total             | 1,0074        | 0,7995         |
| Área de copa             | 4,1511        | 0,2456         |
| <b>Diámetro de fuste</b> | <b>8,5370</b> | <b>0,0361*</b> |
| Número de fustes         | 7,0074        | 0,0717         |

*Nota.* \* El valor p es significativo pues es menor a 0,05.

Los resultados de la prueba post-hoc de Dunn para los valores del diámetro de fuste, identificó que la Incidencia Baja e Incidencia Media, son significativamente diferentes al grupo Sin Incidencia, los grupos obtuvieron valores p de 0,0472 y 0,0232, respectivamente (Tabla 8).

**Tabla 8**

*Resultados de la Prueba de Dunn para el Diámetro de Fuste*

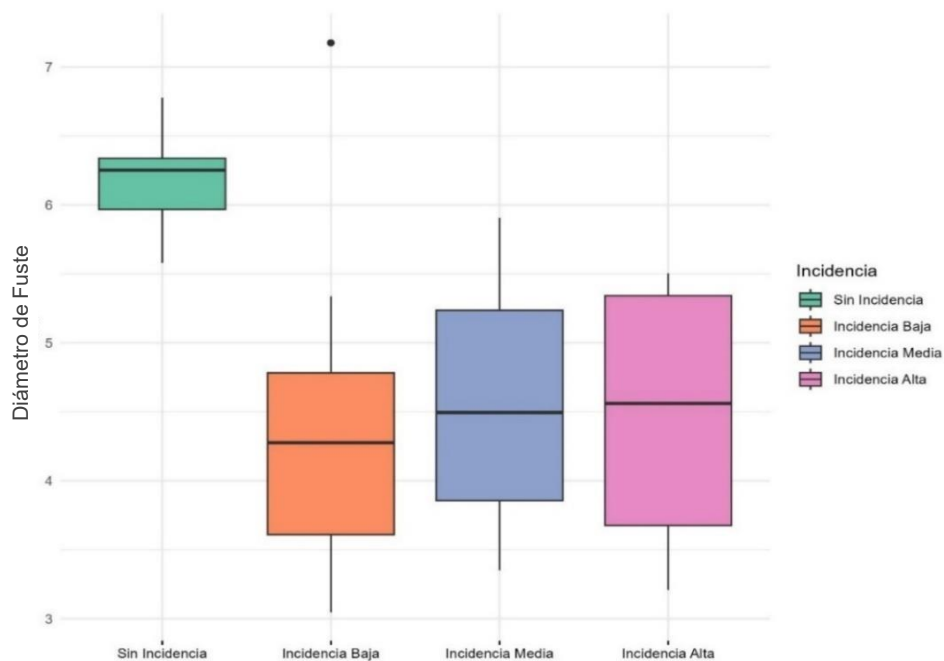
| Variable              | Incidencia Baja | Incidencia Media | Incidencia Alta |
|-----------------------|-----------------|------------------|-----------------|
| Incendencia Baja      | -               | 0,8193           | 1,0000          |
| Incendencia Media     | -               | -                | -               |
| <b>Sin Incidencia</b> | <b>0,0472*</b>  | <b>0,0232*</b>   | 0,0589          |

*Nota.* \*El valor p es significativo pues es menor a 0,05.

El análisis de valores del diámetro de fuste mediante un boxplot (Figura 12), permitió notar la variación notable entre las diferentes clasificaciones de incidencia.

**Figura 12**

*Boxplot del Diámetro de Fuste por Clasificación de Incidencia*



Principalmente, el grupo "Sin Incidencia" mostró valores del diámetro de fuste visiblemente más altos, con una mediana cercana a 6,3 cm y un pequeño rango intercuartil. En contraste, los grupos "Incidencia Baja" e "Incidencia Media" presentaron medianas de aproximadamente 4,3 cm y 4,5 cm, respectivamente, con un mayor rango intercuartil. Finalmente, el grupo "Incidencia Alta" también con un rango amplio, tuvo una mediana cercana a los 4,5 cm, similar al grupo de incidencia media. Estos resultados sugieren una disminución en el diámetro de fuste asociado al incremento de la incidencia, especialmente al comparar con el grupo sin incidencia.

El análisis de componentes principales (PCA), explica un 56% de la varianza total (PC1 = 36.4% y PC2 = 19.6%). Se distinguieron tres componentes principales, diferenciados por sus características topográficas (Figura 13).

El primer grupo (cluster 1, color azul) se asocia a parcelas con orientación hacia el norte (N), mayor pendiente y elevación, y valores bajos de TWI y TPI. Estas condiciones representan zonas más expuestas y de menor acumulación de humedad. Dentro de este grupo se ubican las parcelas CHI\_01, CHI\_02 y CHU\_02, que presentan altos porcentajes de incidencia (Tabla 5), lo cual podría estar relacionado con la mayor exposición y escasa retención hídrica del terreno.

El segundo grupo (cluster 2, color amarillo) se relaciona con orientación este (E), altos valores de TWI y TPI y baja pendiente, condiciones que reflejan áreas más húmedas, protegidas topográficamente y con mayor acumulación de agua superficial. En este grupo destacan las parcelas PAU\_03 y ANC\_01 (Tabla 5), ambas sin incidencia, lo que sugiere que la mayor disponibilidad de humedad y el menor grado de exposición podrían limitar la incidencia observada.

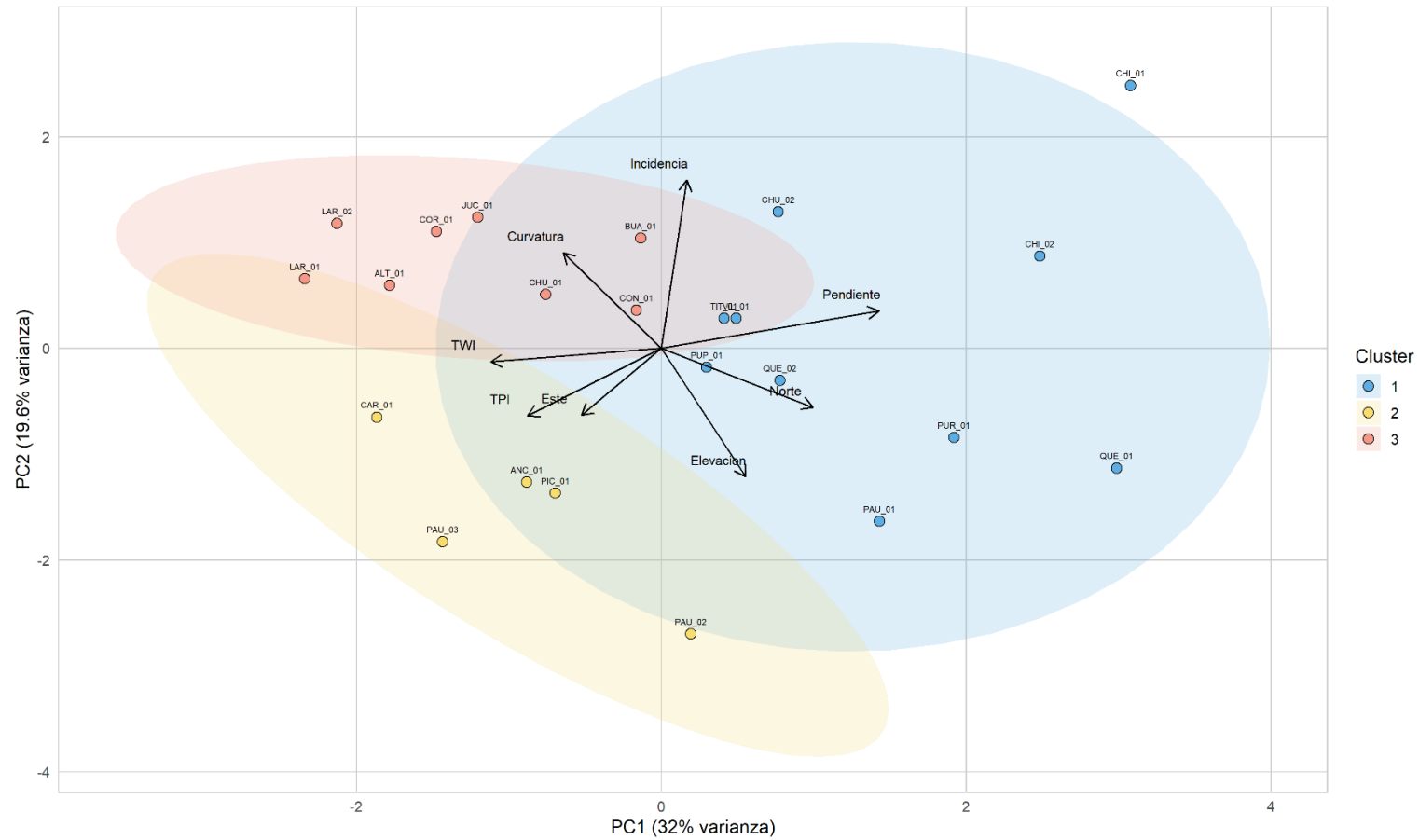
Y el tercer grupo se asocia a la orientación al Sur (S), mayor curvatura y baja elevación, contiene parcelas con incidencia variable (alta, media y baja), entre ellas ALT\_01, COR\_01, CON\_01, JUC\_01 y LAR\_02.

El tercer grupo (cluster 3, color rosado) se asocia principalmente con orientación sur (S), mayor curvatura y baja elevación. Incluye parcelas con niveles variables de incidencia, como ALT\_01, CDR\_01, CON\_01, JUC\_01 y LAR\_02, lo cual podría reflejar la influencia combinada de las variables topográficas.

En conjunto, estos resultados evidencian que la topografía modula significativamente la variación espacial de la incidencia, donde las condiciones de pendiente, orientación y elevación delimitan ambientes contrastantes, algunos más expuestos y secos, y otros más húmedos y protegidos, lo que explica la diferenciación observada entre grupos de parcelas.

**Figura 13**

*Biplot del Análisis de Componentes Principales (PCA)*



*Nota.* El gráfico muestra tres grupos cluster formados con el método K-means, representados con elipses de color.

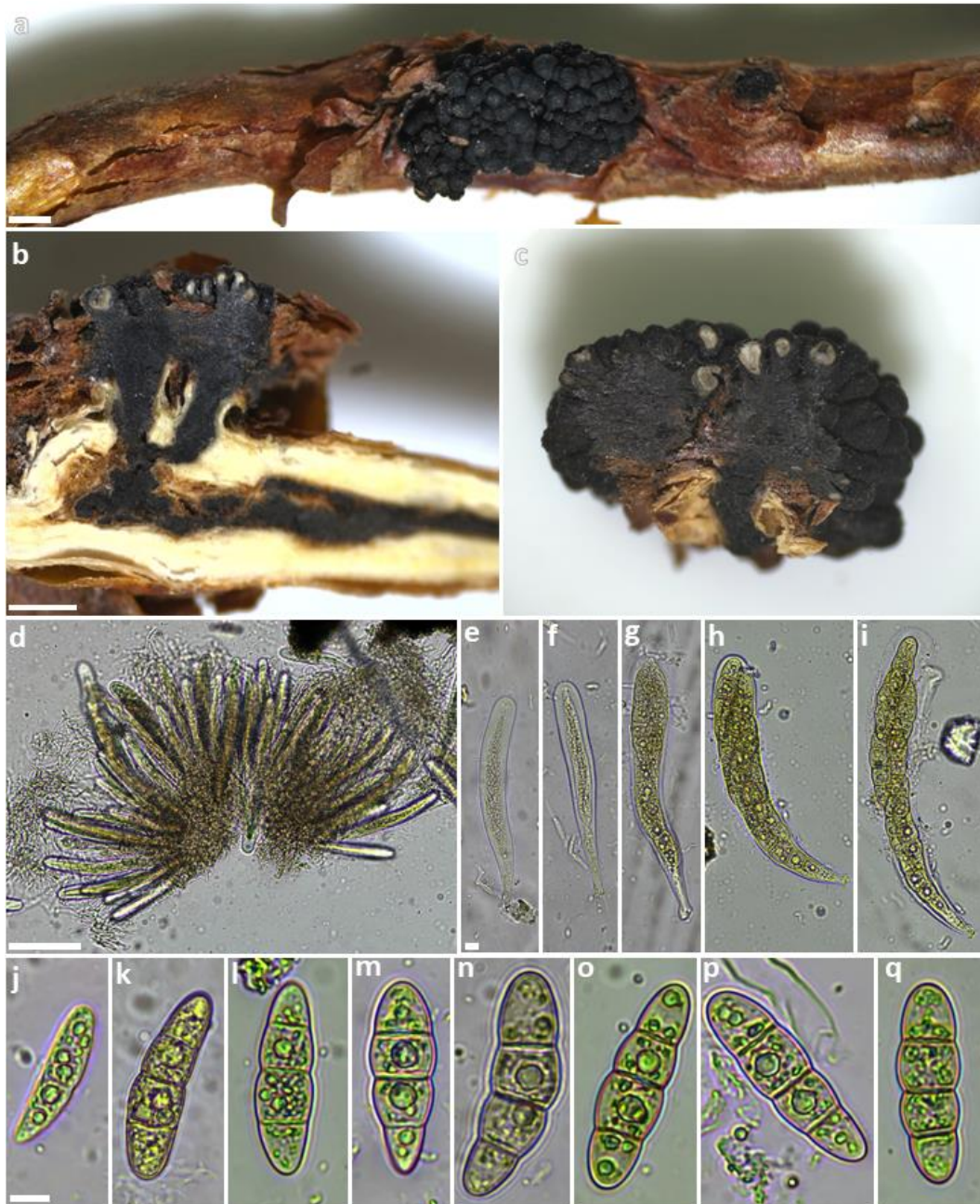
### **3.3. Caracterización Morfológica y Molecular del Agente Asociado al “nudo negro” de la Queñoa (*Polylepis tarapacana*) del Departamento de Tacna**

La caracterización morfológica del agente asociado al “nudo negro” permitió conocer que la estructura oscura, dura y en forma de mora comúnmente llamado nudo negro (es el signo de la enfermedad del mismo nombre, “nudo negro”), corresponde a un ascomata; esto es, numerosos ascomas agrupados sobre las ramas (Figura 14, a). Los ascomatas tuvieron tamaños de 0,02 a 7,2 mm, forma globosa a subglobosa, color marrón oscuro a negro, mate, de textura dura; y a simple vista se observaron solo sobre las ramas, pero a través del corte longitudinal de ramas afectadas, se apreció que su estroma llega hasta la médula, y mediante corte transversal se pudo ver que el estroma se extiende dentro de la médula. Los ascomatas se presentaron en cantidad de hasta 120 unidades por rama, y estuvieron presentes en las tres partes del follaje: inferior, media y superior; y en todos los niveles de ramificación, aunque se observaron ascomatas en el tallo principal solo en un individuo.

El corte longitudinal de los ascomas permitió visualizar pseudotecios (Figura 14, b y c) de forma globosa a subglobosa, de 103-330  $\mu\text{m}$  de ancho y 184,5-487,12  $\mu\text{m}$  de alto. Además, el himenio estuvo compuesto de hifas estériles y ascas (Figura 14, d). Las paráfisis fueron hialinas. Las ascas (Figura 14, e-i) fueron bitunicadas, cilíndricas y pedunculadas de 25-36  $\mu\text{m}$  de ancho y 167-240  $\mu\text{m}$  de largo, el estípite fue corto y encanchado en la base, contenía 8 ascosporas. Las ascosporas (Figura 14, j-q) tuvieron medidas de 44-62  $\mu\text{m}$  de largo y 13-21  $\mu\text{m}$  de ancho, de paredes gruesas, con tres septos, donde el septo central era el más constreñido, las células apicales eran diferentes en cada extremo, una de ellas aguda y la otra redondeada.

**Figura 14**

*Estructuras Macroscópicas y Microscópicas del Agente Asociado al “nudo negro”*



*Nota.* a: ascomata en la superficie de una rama de *P. tarapacana*; b y c: corte longitudinal del ascomata, el estroma y el tejido vegetal; d: ascas y hamatecio; e-g: ascas inmaduras; h-i: ascas maduras; j: ascospora inmadura; k-q: ascosporas maduras. Barras de escala: a-c: 1 mm, d: 100  $\mu$ m, e-q: 10  $\mu$ m.

Finalmente, existieron intentos de cultivar el espécimen, pero éstos fueron fallidas probablemente por las diferencias climatológicas entre los Andes de Tacna y la ciudad de Tacna, además la fase de laboratorio de la presente investigación se realizó en verano.

Por otra parte, la caracterización molecular de la amplificación de la región ITS del ADN extraído de muestras del “nudo negro” mostró una única banda clara de aproximadamente 600 pb, correspondiente al tamaño esperado para hongos, señalando una amplificación exitosa. Posteriormente, la secuenciación mediante el método de Sanger produjo secuencias de 600 pb de buena calidad.

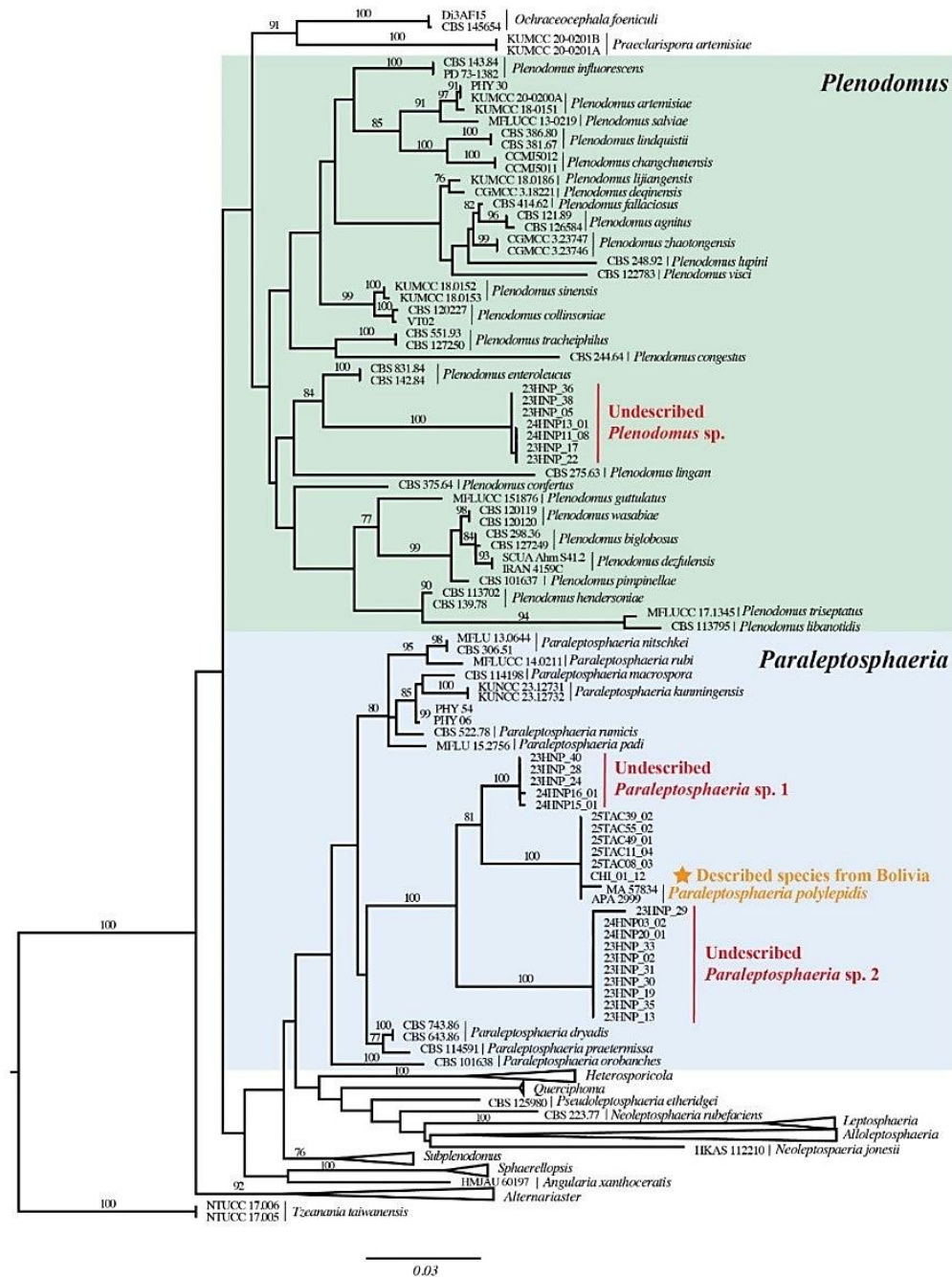
El alineamiento de las seis secuencias mediante BLASTn indicaron un 100% de similitud con la especie *Paraleptosphaeria polylepidis* (Anexos B y C), de Bolivia (número de acceso en GenBank: MK795714.1). Con base en esta coincidencia con la secuencia tipo depositada en GenBank, se determina que las muestras tomadas del agente fúngico asociado al “nudo negro” en bosques de *P. tarapacana* del departamento de Tacna corresponden a *Paraleptosphaeria polylepidis*.

Además, el árbol filogenético (Figura 15) construido según el conjunto de datos concatenados de los genes ITS, LSU, SSU, TEF1, permitió identificar la posición evolutiva de la muestra codificadas como “CHI\_01\_12”, correspondientes al signo del “nudo negro” en bosques de *P. tarapacana* del departamento de Tacna. La muestra se agrupó en un clado bien respaldado con Bootstrap de 100 junto a las muestras anteriormente descritas del Parque Nacional de Sajama, Bolivia, indicando una relación filogenética sólida y consistente.

Estos resultados representan el primer registro molecular confirmado de *Paraleptosphaeria polylepidis* en bosques de *Polylepis tarapacana* fuera de Bolivia, en el sur del Perú, en el departamento de Tacna.

**Figura 15**

*Árbol Filogenético de Máxima Verosimilitud (ML) de Leptosphaeriaceae*



*Nota.* Construido según el conjunto de datos concatenados de cuatro genes (ITS, LSU, SSU, TEF1). Los valores de soporte bootstrap de ML  $\geq 70$  se muestran sobre las ramas. La barra de escala indica 0,03 cambios de nucleótido por sitio. Elaborado por Mary Childress del Laboratorio de Micología Quandt de la Universidad de Colorado Boulder (Estados Unidos).

#### IV. DISCUSIÓN

Los resultados determinaron que la incidencia del “nudo negro” en bosques del departamento de Tacna fue de 32,33% para el área evaluada. A diferencia de los resultados hallados, otro estudio realizado por Coca-Morante en el año 2012, llevado a cabo en el Distrito 3 del Parque Nacional de Sajama, obtuvo un resultado mucho más grave con 54% de árboles con signo de decaimiento. Aunque, dicho estudio fue llevado a cabo en una sola parcela de 100 m x 100 m con 98 individuos muestreados, a diferencia del presente estudio a menos de 100 Km de distancia, con 23 parcelas (3 de 10 m de radio y 20 de 20 m de radio), contando con un total de 1556 individuos evaluados. Es muy probable que la gran diferencia en porcentajes ocurra por las diferencias espaciales y tamaño de muestra, pues el referenciado estudió una parcela grande en un solo punto, mientras que en la presente investigación se distribuyeron parcelas de menor dimensión en diferentes puntos dentro de la extensión del bosque en el departamento de Tacna.

Por otra parte, nuestro estudio evidenció una adecuada representatividad del bosque según la categorización de las parcelas basada en los valores de incidencia. Se registraron 5 parcelas “Sin Incidencia”, 8 con “Incidencia Baja”, 6 con “Incidencia Media” y 4 con “Incidencia Alta”. Esta distribución proporcionó una cantidad y variedad de información suficiente para el desarrollo del análisis posterior.

De acuerdo a los resultados obtenidos, se pudo evidenciar zonas con baja o nula presencia del “nudo negro”; y, por el contrario, también se han registrado zonas con incidencia muy alta, alcanzando hasta un 95,56%. Este contraste en las parcelas estudiadas sugiere un proceso de propagación del agente, donde a través del tiempo, la incidencia seguirá incrementando hasta perjudicar a todos los individuos, causando la muerte. Este

hecho se agrava por la situación actual de cambio climático. El estudio de Sturrock et al. (2011) predice que las enfermedades forestales serán agravadas junto a la sequía y factores de estrés abióticos inducidos por el cambio climático. Es así que la ampliación de la distribución, el incremento de la incidencia y severidad del “nudo negro” en el departamento de Tacna es inminente.

En concordancia con lo anterior, el análisis de la distribución espacial mediante la función L-cross de Ripley evidenció que, generalmente los individuos con presencia del “nudo negro” presentaban un patrón agrupado. No obstante, el análisis L-est aplicado a las parcelas sin incidencia mostró que *P. tarapacana* tiende naturalmente a distribuirse de forma agrupada, incluso sin considerar la presencia del “nudo negro”. Similar a nuestros resultados, Coca-Morante (2012) reportó un patrón agrupado de árboles enfermos en su estudio, basado en un análisis visual de la distribución. Asimismo, los gráficos de interpolación IDW generados para representar la severidad en nuestro estudio también ilustraron zonas de concentración de árboles afectados por el “nudo negro”. La representación espacial facilita la identificación de posibles focos de propagación, útiles para predecir el contagio y orientar estrategias de control (Lorestani et al., 2013).

Los hongos pueden dispersarse de múltiples maneras, pero para la familia Leptosphaeriaceae, la especie *Leptosphaeria maculans* ha sido la más estudiada y se ha determinado que se dispersa por viento y por salpicadura (Guo & Fernando, 2005; Travadon et al., 2007; Zhang et al., 2014). Este tipo de dispersión favorece una propagación local, lo que coincide con los resultados del análisis L-cross de Ripley, que en varias parcelas mostró un patrón de agrupamiento entre árboles con y sin “nudo negro”. Los resultados sugieren que la dispersión del agente patógeno podría ocurrir a través de

focos infecciosos, donde un árbol afectado transmite el patógeno a individuos cercanos, lo que explicaría los agrupamientos.

No obstante, algunas parcelas presentaron patrones aleatorios o de exclusión, lo que indica que podrían estar interviniendo otros factores. Por ejemplo, la presencia de plantas menos susceptibles cerca de los focos iniciales podría haber limitado la propagación (Gorshkov & Tsers, 2022). Específicamente, las parcelas CON\_01, VIL\_01, QUE\_02 y CHU\_02 mostraron un patrón aleatorio. En algunos casos, como CHU\_02, esto podría deberse a una incidencia muy alta, lo que reduce la capacidad del análisis para detectar patrones espaciales claros; mientras que en CON\_01, la baja cantidad de árboles infectados podría ser insuficiente para generar un patrón detectable.

En cuanto a las parcelas con tendencia a la exclusión, TIT\_01, PUP\_01 y JUC\_01 presentan baja incidencia, es decir, lo cual podría señalar una etapa temprana de dispersión que no se detectó en el análisis por la abundancia de árboles “sin incidencia” (Ben-Said, 2021). Por otro lado, CHI\_01 y CHU\_01 también tendieron a la exclusión, pero estas parcelas tienen alta incidencia, lo que podría explicarse por una situación opuesta: quedan muy pocos árboles sin “nudo negro” que aparecen aislados, además, para CHU\_01 es posible que influya el hecho de tener pocos datos (Ben-Said, 2021).

Por otro lado, el cálculo del porcentaje de severidad es un tema en constante discusión, pues se basa en estimaciones visuales muchas veces son poco fiables y cuyos parámetros son inestables al tener diferentes agentes que actúan de diversas formas en su huésped. Para reducir el margen de error, diversos estudios han propuesto estrategias como la asignación de múltiples evaluadores, la capacitación especializada de un solo evaluador, el uso de escalas ordinales cuantitativas o la automatización del proceso

mediante análisis de imágenes (Bock et al., 2015, 2016, 2022; Chiang & Bock, 2022). En este estudio, se optó por minimizar el error fraccionando los síntomas y signos asociados al “nudo negro”, asignando un porcentaje específico a cada uno, y calculando una severidad ponderada donde el signo tuvo mayor peso relativo. La prioridad fue alcanzar la mayor precisión posible al momento de estimar visualmente los porcentajes para cada componente.

Por otra parte, la orientación espacial de las parcelas según su nivel de incidencia mostró patrones sutilmente diferentes. En general se encontró que las parcelas con mayor incidencia del “nudo negro” se direccionaron hacia el Noroeste (NO) hasta el Este (E). Este patrón podría estar asociado con factores como la dirección del viento, humedad, exposición solar, etc. Muy parecido, el estudio de Franco et al. (2021) reportó que la orientación de *P. tarapacana* es de Este (E) a Norte (N), lo que deja un precedente para la distribución natural del huésped del “nudo negro”.

En cuanto a la relación entre la estructura del bosque y la incidencia del “nudo negro”, no se identificaron correlaciones significativas entre las variables estructurales generales y la presencia de la enfermedad, solo se detectó una correlación negativa moderada y no significativa entre la incidencia y el diámetro de fuste.

Sin embargo, la prueba de Kruskal-Wallis analizó los grupos de incidencia revelando diferencias estadísticamente significativas entre el diámetro de fuste entre los árboles “Sin Incidencia” y aquellos con “Baja Incidencia” y “Media Incidencia”. Específicamente, los individuos no afectados por el “nudo negro” presentaron diámetros más robustos en comparación con aquellos que sí mostraron síntomas. Esto sugiere que los árboles con menor desarrollo, con un diámetro de fuste más estrecho, podrían ser más

susceptibles a la infección. Es posible inferir que un diámetro elevado signifique mayor edad del árbol, pero este no es un indicador completamente confiable, pues según estudios dendrocronológicos de Domic & Capriles (2009), se halló que árboles de *P. tarapacana* con diámetros similares pueden tener edades diferentes, pero típicamente, los árboles con mayor diámetro son más altos. Este último hecho también fue corroborado en nuestros resultados de correlación, donde la altura y el diámetro se correlacionaron positivamente de manera significativa. Estos resultados nos dan un indicio del tipo de árboles que son afectados por el “nudo negro. El estudio de López et al. (2023) caracterizó cuatro formas de vida en *Polylepis tarapacana*: arborescentes, árboles enanos, arbustos y brousse tigrée. De acuerdo con sus hallazgos, los árboles enanos y los arbustos tienden a presentar mayores valores de diámetro y altura en comparación con las otras formas. En cuanto a su morfología, los árboles enanos poseen un tronco principal único que culmina en una copa; y los arbustos se caracterizan por tener troncos múltiples, con los ejemplares más bajos ubicados en la periferia y los más altos en el centro. Según el análisis, estas formas de vida de *P. tarapacana* pueden ser aquellas menos susceptibles a tener el “nudo negro”, mientras que la forma brousse tigrée; que se caracteriza por tener troncos ascendentes con copa alargada, sería la más afectada.

Por otro lado, los resultados del PCA parecen indicar relaciones entre la incidencia y las variables morfométricas. Específicamente resalta el grupo que reúne a la mayoría de parcelas con incidencia alta y el grupo que incluye a parcelas de baja a sin incidencia. El primer grupo del PCA agrupa la mayoría de las parcelas con alta incidencia, y se caracteriza por presentar pendientes pronunciadas, alta elevación, orientación hacia el norte y bajo índice de posición topográfica (TPI). Estas variables pueden estar definiendo las preferencias de hábitat del agente en cuestión, y es especialmente interesante, porque la

alta pendiente y elevación suelen asociarse con condiciones de exposición alta a vientos, mayor escurrimiento superficial y suelos drenados, lo cual señalaría poca retención de humedad. Sin embargo, interviene el TPI bajo que indica ubicaciones cóncavas del terreno, lo que permitiría cierta acumulación local de agua y protección topográfica (Macek et al., 2009; Wilson & Gallant, 2000). Se podría decir que se genera un microambiente seco, en donde se puede favorecer la germinación o dispersión aérea localizada. Además, en esta área de estudio, *Polylepis tarapacana* habita en condiciones adversas. Como señalan Domic & Capriles (2009), al acercarse al límite superior de la línea de árboles, las bajas temperaturas del suelo inhiben el desarrollo de raíces, lo que puede comprometer la salud del árbol, aumentar su vulnerabilidad y posiblemente facilitar la infección por hongos oportunistas.

En contraste, el segundo grupo de parcelas de baja o nula incidencia, se asoció a un TPI alto, índice de humedad topográfica (TWI) alto, alta curvatura y pendientes suaves. Estas condiciones describen terrenos cóncavos, húmedos y estables, con mayor capacidad de retención de agua y menor exposición directa al viento. Las buenas condiciones topográficas que presenta este grupo, favorecen el desarrollo saludable de *Polylepis tarapacana*. Si *P. tarapacana* ya es bueno resistiendo bajas temperaturas y adversidad del clima bastante bien (García-Núñez et al., 2004; Rada et al., 2001), en *Polylepis tarapacana*, López et al. (2023) coincidió en que estas condiciones son favorables y permiten mayor vitalidad fisiológica. Esto puede señalar que en zonas menos estresantes para *Polylepis*, guardan mejor resistencia ante ataques de otros agentes. En este contexto, la baja incidencia del hongo podría explicarse no solo por limitaciones para la dispersión o germinación, sino también por la mayor fortaleza del hospedero bajo condiciones óptimas.

Los resultados de caracterización morfológica coinciden con el primer reporte del “nudo negro” de Macía et al. (2005) y el estudio de recategorización taxonómica de Piątek et al. (2020); correspondiente a *Paraleptosphaeria polylepidis*. Las características estructurales y biométricas fueron concordantes.

Además, la caracterización molecular corroboró que la secuencia genética extraída de la muestra del “nudo negro”, corresponde a *Paraleptosphaeria polylepidis*, con un 100% de similitud con las secuencias depositadas en NCBI; asimismo, las relaciones filogenéticas visualizadas mediante el árbol filogenético, relacionaron fuertemente al espécimen investigado con *Paraleptosphaeria polylepidis* descrita anteriormente en Bolivia. De esa manera, se confirma la ampliación de su distribución geográfica, ya no solo en bosques de *P. tarapacana* de Bolivia, sino que también en el departamento de Tacna, al sur del Perú.

## V. CONCLUSIONES

- Se determinó que la distribución espacial del “nudo negro” de la queñoa (*Polylepis tarapacana*) en el departamento de Tacna presentó un patrón agrupado, lo que sugiere que la infección tiende a concentrarse en ciertos grupos de individuos, aunque en algunos sitios se observaron patrones dispersos o aleatorios.
- Se determinó que la incidencia promedio del “nudo negro” de la queñoa (*Polylepis tarapacana*) en Tacna fue del 32,33 %; si bien mostró una relación moderada con el diámetro de fuste que no fue significativa, según análisis por categorías de la incidencia, había diferencia significativa entre los diámetros de fuste de la categoría de incidencia baja y media, donde mayor diámetro de fuste de árbol señalaba menor incidencia del “nudo negro”.
- Se caracterizó morfológica y molecularmente al agente asociado al “nudo negro” de la queñoa (*Polylepis tarapacana*) y se halló que corresponde a *Paraleptosphaeria polylepidis*, constituyendo el segundo reporte de esta especie y ampliando su distribución al departamento de Tacna, Perú.

## VI. RECOMENDACIONES

- Investigar las estructuras del “nudo negro” en cultivo y realizar la prueba de patogenicidad para confirmar la relación patógeno-hospedero.
- Realizar estudios ecológicos del hongo *Paraleptosphaeria polylepidis*, incluyendo su ciclo de vida, ecología, mecanismos de dispersión y posibles hospedadores alternativos.
- Estudiar la evolución histórica del patógeno mediante análisis moleculares de muestras históricas en herbarios, para determinar el origen temporal y geográfico de *Paraleptosphaeria polylepidis*.
- Monitorear las parcelas ya establecidas para registrar cambios en incidencia y severidad.
- Optimizar las metodologías para evaluar la severidad del “nudo negro” en *P. tarapacana* específicamente.
- Evaluar estrategias de manejo o erradicación del “nudo negro” para la protección del bosque de *Polylepis tarapacana*.

## VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agrios, G. N. (2005). *Fitopatología* (2nd ed.). Limusa: Noriega Editores.
- Alinari, J., Von Müller, A., & Renison, D. (2015). The contribution of fire damage to restricting high mountain *Polylepis australis* forests to ravines: Insights from an unreplicated comparison. *Ecología Austral*, 25, 11–18.
- Argibay, D. S., & Renison, D. (2018). Effect of fire and livestock on *Polylepis australis* (Rosaceae) woodlands along an altitudinal gradient in the mountains of central Argentina. *Bosque*, 39(1), 145–150. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002018000100145>
- Astudillo, P. X., Grass, I., Siddons, D. C., Schabo, D. G., & Farwig, N. (2020). Centrality in Species-Habitat Networks Reveals the Importance of Habitat Quality for High-Andean Birds in *Polylepis* Woodlands. *Ardeola*, 67(2), 307 – 324. <https://doi.org/10.13157/arla.67.2.2020.ra5>
- Azócar, A., Fermin, R., & García-Nuñez, C. (2007). Functional characteristics of the arborescent genus *Polylepis* along a latitudinal gradient in the high Andes. *Interciencia*, 32(10), 663–668. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=33901003>
- Bedoya-Canas, L. E., López-Hernández, F., & Cortés, A. J. (2024). Climate change responses of high-elevation *Polylepis* forests. *Forests*, 15(5), 1–20. <https://doi.org/10.3390/f15050811>
- Ben-Said, M. (2021). Spatial point-pattern analysis as a powerful tool in identifying pattern-process relationships in plant ecology: An updated review. *Ecological Processes*, 10(1), 56. <https://doi.org/10.1186/s13717-021-00314-4>

- Bock, C. H., Chiang, K.-S., & Del Ponte, E. M. (2022). Plant disease severity estimated visually: A century of research, best practices, and opportunities for improving methods and practices to maximize accuracy. *Tropical Plant Pathology*, *47*(1), 25–42. <https://doi.org/10.1007/s40858-021-00439-z>
- Bock, C. H., Chiang KuoSzu, C. K., & Del Ponte, E. M. (2016). Accuracy of plant specimen disease severity estimates: Concepts, history, methods, ramifications and challenges for the future. *CABI Reviews*, 1–21. <https://doi.org/10.1079/PAVSNNR201611032>
- Bock, C. H., El Jarroudi, M., Kouadio, L. A., Mackels, C., Chiang, K.-S., & Delfosse, P. (2015). Disease severity estimates—effects of rater accuracy and assessment methods for comparing treatments. *Plant Disease*, *99*(8), 1104–1112. <https://doi.org/10.1094/PDIS-09-14-0925-RE>
- Boza, T., & Kessler, M. (2022). A monograph of the genus *Polylepis* (Rosaceae). *PhytoKeys*, *203*, 1–274. <https://doi.org/10.3897/phytokeys.203.83529>
- Braun, G. (1997). The Use of Digital Methods in Assessing Forest Patterns in an Andean Environment: The *Polylepis* Example. *Mountain Research and Development*, *17*(3), 253–262. <https://doi.org/10.2307/3673852>
- Caballero-Villalobos, L., Fajardo-Gutiérrez, F., Calbi, M., & Silva-Arias, G. A. (2021). Climate change can drive a significant loss of suitable habitat for *Polylepis quadrijuga*, a treeline species in the Sky Islands of the northern Andes. *Frontiers in Ecology and Evolution*, *9*. <https://doi.org/10.3389/fevo.2021.661550>
- Castro, A., Davila, C., Laura, W., Cubas, F., Avalos, G., López, C., Villena, D., Valdez, M., Urbiola, J., Trebejo, I., Menis, L., & Marín, D. (2021). *Climas del Perú: mapa de*

*clasificación climática nacional*. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), Proyecto Apoyo a la Gestión del Cambio Climático.

Célleri, R., & Feyen, J. (2009). The hydrology of tropical andean ecosystems: Importance, knowledge status, and perspectives. *Mountain Research and Development*, 29(4), 350 – 355. <https://doi.org/10.1659/mrd.00007>

Cervantes, R., Sánchez, J. M., Alegre, J., Rendón, E., Baiker, J. R., Locatelli, B., & Bonnesoeur, V. (2022). Contribución de los ecosistemas altoandinos en la provisión del servicio ecosistémico de regulación hídrica. *Ecología Aplicada*, 20(2), 137–146. <https://doi.org/10.21704/rea.v20i2.1804>

Chanove-Manrique, A., & Cárdenas-Pillco, B. (2024). Landscape fragmentation and loss of connectivity in *Polylepis* forests in Peru and its vulnerability to climate change. *Madera y Bosques*, 30(3), 1–17. <https://doi.org/10.21829/myb.2024.3032593>

Chiang, K.-S., & Bock, C. H. (2022). Understanding the ramifications of quantitative ordinal scales on accuracy of estimates of disease severity and data analysis in plant pathology. *Tropical Plant Pathology*, 47(1), 58–73. <https://doi.org/10.1007/s40858-021-00446-0>

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>

Coca-Morante, M. (2012). Assessment of *Leptosphaeria polylepidis* Decline in *Polylepis* tarapacana Phil. Trees in District 3 of the Sajama National Park, Bolivia. In A. A. Oteng-

- Amoako (Ed.), *New Advances and Contributions to Forestry Research* (p. 256). IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/33599>
- Coca-Morante, M. (2022). Forest Andeans: *Polylepis subtusalbida* (Rosaceae) disease caused by *Leptosphaeria* sp. in the National Park Tunari forest of Cochabamba, Bolivia. *Academia Letters*, 1–4. <https://doi.org/10.20935/al4714>
- Cooke, B. M. (2002). Disease assessment and yield loss. In B. M. Cooke, G. Jones, & B. Kaye (Eds.), *The Epidemiology of Plant Diseases* (2nd ed., pp. 43–80). Springer. [https://doi.org/10.1007/1-4020-4581-6\\_2](https://doi.org/10.1007/1-4020-4581-6_2)
- 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/https://doi.org/10.25260/EA.18.28.1.1.766>
- Disease measurement in plant pathology. (1948). *Transactions of the British Mycological Society*, 31(3), 343–345. [https://doi.org/10.1016/S0007-1536\(48\)80018-5](https://doi.org/10.1016/S0007-1536(48)80018-5)
- Deacon, J. W. (2006). *Fungal biology* (4th ed.). BLACKWELL PUBLISHING.
- Domic, A. I., & Capriles, J. M. (2009). Allometry and effects of extreme elevation on growth velocity of the Andean tree *Polylepis tarapacana* Philippi (Rosaceae). *Plant Ecology*, 205(2), 223–234. <https://doi.org/10.1007/s11258-009-9612-5>
- Domic, A. I., Camilo, G. R., & Capriles, J. M. (2014). Small-scale farming and grazing reduce regeneration of *Polylepis tomentella* (Rosaceae) in the semiarid Andes of Bolivia. *Biotropica*, 46(1), 106–113. <https://doi.org/10.1111/btp.12075>

- Domic, A. I., & Capriles, J. M. (2009). Allometry and effects of extreme elevation on growth velocity of the Andean tree *Polylepis tarapacana* Philippi (Rosaceae). *Plant Ecology*, 205(2), 223–234. <https://doi.org/10.1007/s11258-009-9612-5>
- Dunn, O. J. (1964). Multiple Comparisons Using Rank Sums. *Technometrics*, 6(3), 241–252. <https://doi.org/10.1080/00401706.1964.10490181>
- Fattorini, L., Franceschi, S., Marcheselli, M., Pisani, C., & Pratelli, L. (2023). Design-based spatial interpolation with data driven selection of the smoothing parameter. *Environmental and Ecological Statistics*, 30(1), 103–129. <https://doi.org/10.1007/s10651-023-00555-w>
- Fjeldså, J. (2002). *Polylepis* Forests: Vestiges of a vanishing ecosystem in the Andes. *Ecotropica*, 8, 111–123.
- Franco, P., Cáceres, C., Navarro, M., Jove, C., Ignacio, J., & Oyague, E. (2021a). Bosques de *Polylepis tarapacana* en la cuenca Maure, extremo sur del Perú. Oportunidades para su conservación. *Estudios Geográficos*, 82(290), e059. <https://doi.org/10.3989/estgeogr.202071.071>
- Franco, P., Cáceres, C., Navarro, M., Jove, C., Ignacio, J., & Oyague, E. (2021b). Bosques de *Polylepis tarapacana* en la cuenca Maure, extremo sur del Perú. Oportunidades para su conservación. *Estudios Geográficos*, 82(290), e059. <https://doi.org/10.3989/estgeogr.202071.071>
- Fundación para la Innovación Agraria (FIA). (2022). *Determinación de la etiología del daño en bosques de queñoa de altura (Polylepis tarapacana) y desarrollo preliminar de medidas de control biológico.*

- García-Núñez, C., Rada, F., Boero, C., González, J., Gallardo, M., Azócar, A., Liberman-Cruz, M., Hilal, M., & Prado, F. (2004). Leaf gas exchange and water relations in *Polylepis tarapacana* at extreme altitudes in the Bolivian Andes. *Photosynthetica*, 42(1), 133–138. <https://doi.org/10.1023/B:PHOT.0000040581.94641.ed>
- Gareca, E. E., Hermy, M., Fjeldså, J., & Honnay, O. (2010). *Polylepis* woodland remnants as biodiversity islands in the Bolivian high Andes. *Biodiversity and Conservation*, 19(12), 3327–3346. <https://doi.org/10.1007/s10531-010-9895-9>
- Giorgis, M. A., Cingolani, A. M., Teich, I., & Poca, M. (2020). Can livestock coexist with *Polylepis australis* forests in mountains of central Argentina? Setting thresholds for a land sharing landscape. *Forest Ecology and Management*, 457, 117728. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117728>
- Giorgis, M. A., Cingolani, A. M., Teich, I., Renison, D., & Hensen, I. (2010). Do *Polylepis australis* trees tolerate herbivory? Seasonal patterns of shoot growth and its consumption by livestock. *Plant Ecology*, 207(2), 307–319. <https://doi.org/10.1007/s11258-009-9674-4>
- Gorshkov, V., & Tsers, I. (2022). Plant susceptible responses: The underestimated side of plant–pathogen interactions. *Biological Reviews*, 97(1), 45–66. <https://doi.org/10.1111/brv.12789>
- González, L. Carlos. (1981). *Introducción a la fitopatología* (B. Escoto, Ed.; 1ra ed). Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura.
- Gosling, W. D., Hanselman, J. A., Knox, C., Valencia, B. G., & Bush, M. B. (2009). Long-term drivers of change in *Polylepis* woodland distribution in the central Andes. *Journal of*

*Vegetation Science*, 20(6), 1041–1052. <https://doi.org/10.1111/j.1654-1103.2009.01102.x>

Gradstein, S. R., & León-Yáñez, S. (2020). Liverwort diversity in *Polylepis pauta* forests of Ecuador under different climatic conditions. *Neotropical Biodiversity*, 6(1), 138–146. <https://doi.org/10.1080/23766808.2020.1809273>

Guo, X. W., & Fernando, W. G. D. (2005). Seasonal and diurnal patterns of spore dispersal by *Leptosphaeria maculans* from canola stubble in relation to environmental conditions. *Plant Disease*, 89(1), 97–104. <https://doi.org/10.1094/PD-89-0097>

Gutiérrez-Cortés, I., Simpson, S., Manzano, M., Villca, H., Castro, B., Ramond, J.-B., del Pilar Fernández Murillo, M., & Alfaro, F. D. (2025). The impact of *Polylepis tarapacana* on soil microbial communities in the andean dry puna of Chile. *Journal of Arid Environments*, 227, 105332. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2025.105332>

Hanselman, J. A., Gosling, W. D., Paduano, G. M., & Bush, M. B. (2005). Contrasting pollen histories of MIS 5e and the Holocene from Lake Titicaca (Bolivia/Peru). *Journal of Quaternary Science*, 20(7–8), 663–670. <https://doi.org/10.1002/jqs.979>

Hastorf, C. A., Whitehead, W. T., & Johannessen, S. (2005). Late prehistoric wood use in an andean intermontane valley. *Economic Botany*, 59(4), 337–355. [https://doi.org/10.1663/0013-0001\(2005\)059\[0337:LPWUIA\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1663/0013-0001(2005)059[0337:LPWUIA]2.0.CO;2)

Imaña-Encinas, 2011. (2011). *Mensura dasométrica* (2da ed.). Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Florestal.

Imfeld, N., Sedlmeier, K., Gubler, S., Correa Marrou, K., Davila, C. P., Huerta, A., Lavado-Casimiro, W., Rohrer, M., Scherrer, S. C., & Schwierz, C. (2021). A combined view on

- precipitation and temperature climatology and trends in the southern Andes of Peru. *International Journal of Climatology*, 41(1), 679–698. <https://doi.org/10.1002/joc.6645>
- International Union for Conservation of Nature (IUCN). (2024, August 12). *The IUCN Red List of Threatened Species*.
- Izco, F., & Ariz, A. (2003). *Manual de medición forestal* (Asociación Foresna - Zurgaia, Ed.).
- Jolliffe, I. T., & Cadima, J. (2016). Principal component analysis: a review and recent developments. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 374(2065), 20150202. <https://doi.org/10.1098/rsta.2015.0202>
- Kessler, M. (1995). Present and potential distribution of *Polylepis* (Rosaceae) forests in Bolivia. In S. Churchill, H. Balslev, E. Forero, & J. Luteyn (Eds.), *Biodiversity and Conservation of Neotropical Montane Forests* (pp. 281–294). New York Botanical Garden. <https://www.researchgate.net/publication/247777926>
- Kessler, M. (2014). The “*Polylepis* problem”: Where do we stand? *ECOTROPICA*, 8, 97–110. <https://www.researchgate.net/publication/247774455>
- Kessler, M., & Schmidt-Lebuhn, A. N. (2006). Taxonomical and distributional notes on *Polylepis* (Rosaceae). *Organisms Diversity and Evolution*, 6(1), 67–69. <https://doi.org/10.1016/j.ode.2005.04.001>
- Kessler, M., Toivonen, J. M., Sylvester, S. P., Kluge, J., & Hertel, D. (2014). Elevational patterns of *Polylepis* tree height (Rosaceae) in the high Andes of Peru: Role of human

impact and climatic conditions. *Frontiers in Plant Science*, 5(May), 1–12.  
<https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00194>

Kruskal, W. H., & Wallis, W. A. (1952). Use of ranks in one-criterion variance analysis. *Journal of the American Statistical Association*, 47(260), 583–621.  
<https://doi.org/10.1080/01621459.1952.10483441>

Lema, Á. (1979). *Introducción a la dasometría*.  
<https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/2111>

Lloyd, H., & Marsden, S. J. (2008). Bird community variation across *Polylepis* woodland fragments and matrix habitats: Implications for biodiversity conservation within a high Andean landscape. *Biodiversity and Conservation*, 17(11), 2645–2660.  
<https://doi.org/10.1007/s10531-008-9343-2>

Loewe-Muñoz, V., Cachinero-Vivar, A. M., Camarero, J. J., Río, R. Del, Delard, C., & Navarro-Cerrillo, R. M. (2024). Dendrochronological analysis of *Pinus pinea* in central Chile and South Spain for sustainable forest management. *Biology*, 13(8), 628.  
<https://doi.org/10.3390/biology13080628>

López, F., García, F., & del Cerro Antonio. (2003). *Dasometría: Ciencia de la medición forestal*. POPULAR LIBROS Octavio Cuartero.

López, V. L., Botta, L., Martínez Pastur, G., Lencinas, M. V., Cuyckens, G. A. E., & Cellini, J. M. (2023). Characterization of *Polylepis tarapacana* life forms in the highest-elevation altiplano in South America: Influence of the topography, climate and human uses. *Plants*, 12(9). <https://doi.org/10.3390/plants12091806>

- Lotwick, H. W., & Silverman, B. W. (1982). Methods for analysing spatial processes of several types of points. *Journal of the Royal Statistical Society Series B-Methodological*, *44*, 406–413. <https://doi.org/10.1111/j.2517-6161.1982.tb01221.x>
- Macek, P., Macková, J., & de Bello, F. (2009). Morphological and ecophysiological traits shaping altitudinal distribution of three *Polylepis* treeline species in the dry tropical Andes. *Acta Oecologica*, *35*(6), 778–785. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.actao.2009.08.013>
- Macía, M. J., Palm, M. E., & Martín, M. P. (2005). A new species of *Leptosphaeria* (Ascomycotina, Pleosporales) on Rosaceae from Bolivia. *Mycotaxon*, *93*(1), 401–406.
- Marcora, P., Hensen, I., Renison, D., Seltmann, P., & Wesche, K. (2008). The performance of *Polylepis australis* trees along their entire altitudinal range: Implications of climate change for their conservation. *Diversity and Distributions*, *14*(4), 630–636. <https://doi.org/10.1111/j.1472-4642.2007.00455.x>
- Mosquera, G. M., Marín, F., Carabajo-Hidalgo, A., Asbjornsen, H., Célleri, R., & Crespo, P. (2024). Ecohydrological assessment of the water balance of the world's highest elevation tropical forest (*Polylepis*). *Science of The Total Environment*, *941*, 173671. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173671>
- NASA Langley Research Center. (2024). *NASA POWER: Prediction of worldwide energy resources [Dataset]*.
- Navarro, G., Arrázola, S., Balderrama, J. A., Ferreira, W., De la Barra, N., Antezana, C., Gómez, I., & Mercado, M. (2010). Diagnóstico del estado de conservación y

caracterización de los bosques de *Polylepis* en Bolivia y su avifauna. *Revista Boliviana de Ecología y Conservación Ambiental*, 28, 1–35.

Piątek, M., Rodríguez-Flakus, P., Domic, A., Palabral-Aguilera, A. N., Gómez, M. I., & Flakus, A. (2020). Phylogenetic placement of *Leptosphaeria polylepidis*, a pathogen of Andean endemic *Polylepis tarapacana*, and its newly discovered mycoparasite *Sajamaea mycophila* gen. et sp. nov. *Mycological Progress*, 19(1), 1–14. <https://doi.org/10.1007/s11557-019-01535-w>

Purcell, J., Brelsford, A., & Kessler, M. (2004). The World's Highest Forest: A better understanding of the properties of Andean queñua woodlands has major implications for their conservation. *American Scientist*, 92(5), 454–461. <http://www.jstor.org/stable/27858454>

Rada, F., Azócar, A., Briceño, B., González, J., & García-Núñez, C. (1996). Carbon and water balance in *Polylepis sericea*, a tropical treeline species. *Trees*, 10(4), 218–222. <https://doi.org/10.1007/BF02185672>

Rada, F., García-Núñez, C., Boero, C., Gallardo, M., Hilal, M., González, J., Prado, F., Liberman-Cruz, M., & Azócar, A. (2001). Low-temperature resistance in *Polylepis tarapacana*, a tree growing at the highest altitudes in the world. *Plant, Cell & Environment*, 24(3), 377–381. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.2001.00685.x>

Rada, F., García-Núñez, C., Gallardo, M., Hilal, M., González, J., Prado, F., Liberman-Cruz, M., & Azócar, A. (2001). Low temperature resistance in *Polylepis tarapacana*, a tree growing at the highest altitudes in the world. *Plant, Cell and Enviroment*, 24, 377–381. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.2001.00685.x>

- Raudaskoski, A. (2014). *Human disturbance on Polylepis mountain forests in Peruvian Andes* [Tesis de Maestría]. Universidad de Jyväskylä.
- Rehm, E. M., & Feeley, K. J. (2013). Forest patches and the upward migration of timberline in the southern peruvian Andes. *Forest Ecology and Management*, 305, 204–211. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.05.041>
- Renison, D., Cingolani, A., & Suarez, R. (2002). Efectos del fuego sobre un bosquecillo de *Polylepis australis* (Rosaceae) en las montañas de Córdoba, Argentina. *Revista Chilena de Historia Natural*, 75, 719–727.
- Renison, D., Cuyckens, G. A. E., Pacheco, S., Guzmán, G. F., Grau, H. R., Marcora, P., Robledo, G., Cingolani, A. M., Dominguez, J., Landi, M., Bellis, L., & Hensen, I. (2013). Distribución y estado de conservación de las poblaciones de árboles y arbustos del género *Polylepis* (Rosaceae) en las montañas de Argentina. *Ecología Austral*, 23(1), 27–36. <https://doi.org/10.25260/EA.13.23.1.0.1189>
- Renison, D., Morales, L., Cuyckens, G., Sevillano, C. S., & Cabrera, D. M. (2018). Ecología y conservación de los bosques y arbustales de *Polylepis*: ¿Qué sabemos y qué ignoramos? *Ecología Austral*, 28(1), 163–174. <https://doi.org/10.25260/EA.18.28.1.1.522>
- Ripley, B. D. (1976). The second-order analysis of stationary point processes. *Journal of Applied Probability*, 13(2), 255–266. <https://doi.org/DOI: 10.2307/3212829>
- Rodríguez, F., & Behling, H. (2012). Late quaternary vegetation, climate and fire dynamics, and evidence of early to mid-Holocene *Polylepis* forests in the Jimbura region of the

- southernmost Ecuadorian Andes. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 350–352, 247–257. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2012.07.004>
- Seem, R. C. (1984). Disease incidence and severity relationships. *Annual Review of Phytopathology*, 22, 113–150.
- Senanayake, I. C., Rathnayaka, A. R., Diana S, M., Mark S, C., Eleni, G., Hyang Burm, L., Vedprakash G, H., Dhandevi, P., Lakmali S, D., Subodini N, W., Digvijayini, B., Ishani D, G., Pranami D, A., Chitrabhanu S, B., Ruvishika Shehali, J., Dhanushka N., W., Rajesh, J., Darbhe Jayarama, B., & MM, X. (2020). Morphological approaches in studying fungi: collection, examination, isolation, sporulation and preservation. *Mycosphere*, 11(1), 2678–2754. <https://doi.org/10.5943/MYCOSPHERE/11/1/20>
- Sevillano-Ríos, C. S., & Rodewald, A. D. (2021). Responses of *Polylepis* birds to patch and landscape attributes in the High Andes. *Neotropical Biodiversity*, 7(1), 5–22. <https://doi.org/10.1080/23766808.2020.1869900>
- Shapiro, S. S., & Wilk, M. B. (1965). An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika*, 52(3/4), 591–611. <https://doi.org/10.2307/2333709>
- Shepard, D. (1968). A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data. *Proceedings of the 1968 23rd ACM National Conference*, 8. <https://doi.org/10.1145/800186.810616>
- Solla, A., Sánchez-Miranda, Á., & Julio Camarero, J. (2006). Radial-growth and wood anatomical changes in *Abies alba* infected by *Melampsorella caryophyllacearum*: a dendroecological assessment of fungal damage. *Ann. For. Sci.*, 63(3), 293–300. <https://doi.org/10.1051/forest:2006008>

- Spearman, C. (1904). The proof and measurement of association between two things. *The American Journal of Psychology*, 15(1), 72–101. <https://doi.org/10.2307/1412159>
- Sturrock, R. N., Frankel, S. J., Brown, A. V, Hennon, P. E., Kliejunas, J. T., Lewis, K. J., Worrall, J. J., & Woods, A. J. (2011). Climate change and forest diseases. *Plant Pathology*, 60(1), 133–149. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2010.02406.x>
- Teich, I., Cingolani, A. M., Renison, D., Hensen, I., & Giorgis, M. A. (2005). Do domestic herbivores retard *Polylepis australis* Bitt. woodland recovery in the mountains of Córdoba, Argentina? *Forest Ecology and Management*, 219(2), 229–241. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.08.048>
- Toivonen, J. M. (2014). *Determinants of Polylepis (Rosaceae) forest distribution and treeline formation in the High Andes* [Graduate thesis]. University of Turku.
- Travadon, R., Bousset, L., Saint-Jean, S., Brun, H., & Sache, I. (2007). Splash dispersal of *Leptosphaeria maculans* pycnidiospores and the spread of blackleg on oilseed rape. *Plant Pathology*, 56(4), 595–603. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2007.01572.x>
- Valencia, B. G., Bush, M. B., Coe, A. L., Orren, E., & Gosling, W. D. (2018). *Polylepis* woodland dynamics during the last 20,000 years. *Journal of Biogeography*, 45(5), 1019–1030. <https://doi.org/10.1111/jbi.13209>
- Van der Plank, J. (1975). Principles of plant infection. In *Australian Plant Pathology Society Newsletter* (Issue 3). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-711460-6.X5001-5>

- Vásquez, E., Ladd, B., & Borchard, N. (2014). Carbon storage in a high-altitude *Polylepis* woodland in the Peruvian Andes. *Alpine Botany*, 124(1), 71–75.  
<https://doi.org/10.1007/s00035-014-0126-y>
- Wei, J., Yang, L., Jiang, Z., Yao, H., Yu, H., Luo, F., Qiao, X., Xu, Y., & Jiang, M. (2025). Spatial distribution and intraspecific and interspecific associations of dominant tree species in a deciduous broad-leaved forest in Shennongjia, China. *Diversity*, 17(5).  
<https://doi.org/10.3390/d17050335>
- White, T. J., Bruns, T., Lee, S., & Taylor, J. (1990). Amplification and direct sequencing of fungal ribosomal RNA genes for phylogenetics. In M. A. Innis, D. H. Gelfand, J. J. Sninsky, & T. J. White (Eds.), *PCR Protocols* (pp. 315–322). Academic Press.  
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-372180-8.50042-1>
- Wilson, J., & Gallant, J. (2000). Terrain analysis: Principles and applications. In J. P. Wilson & J. Gallant (Eds.), *Terrain analysis* (Primera Edición, Vol. 479, pp. 1–27). Wiley & Sons, Inc.
- Zhang, X., White, R. P., Demir, E., Jedryczka, M., Lange, R. M., Islam, M., Li, Z. Q., Huang, Y. J., Hall, A. M., Zhou, G., Wang, Z., Cai, X., Skelsey, P., & Fitt, B. D. L. (2014). *Leptosphaeria* spp., phoma stem canker and potential spread of *L. maculans* on oilseed rape crops in China. *Plant Pathology*, 63(3), 598–612.  
<https://doi.org/10.1111/ppa.12146>
- Zutta, B. R., & Rundel, P. W. (2017). Modeled Shifts in *Polylepis* Species Ranges in the Andes from the Last Glacial Maximum to the Present. *Forests*, 8(7).  
<https://doi.org/10.3390/f8070232>

Zutta, B. R., Rundel, P. W., Saatchi, S., Casana, J. D., Gauthier, P., Soto, A., Velazco, Y., Buermann, W., & Brian Zutta, E. R. (2012). Prediciendo la distribución de *Polylepis*: bosques Andinos vulnerables y cada vez más importantes. *Polylepis Rev. Peru. Biol*, 19(2), 205–212. <http://mobot.mobot.org/W3T/Search/>

## VIII. ANEXOS

### Anexo A

*Conteo Total de Árboles con y sin “nudo negro” por Parcela*

| Código | Coordenadas |             | Severidad ponderada (%) | Total de árboles contados | Total de árboles vivos | N° de árboles sin “nudo negro” | N° de árboles con “nudo negro” | Incidencia (%) | Clasificación   | N° total de árboles muertos | N° de árboles muertos sin “nudo negro” | N° de árboles muertos con “nudo negro” |
|--------|-------------|-------------|-------------------------|---------------------------|------------------------|--------------------------------|--------------------------------|----------------|-----------------|-----------------------------|--|--|
|        | x           | y           |                         |                           |                        |                                |                                |                |                 |                             |  |  |
| ANC_01 | 419925.349  | 8057140.731 | 25,34                   | 160                       | 153                    | 153                            | 0                              | 0.00           | Sin Incidencia  | 7                           | 7                                      | 0                                      |
| QUE_01 | 419305.01   | 8052222.672 | 18,36                   | 148                       | 148                    | 148                            | 0                              | 0.00           | Sin Incidencia  | 0                           | 0                                      | 0                                      |
| PAU_01 | 416588.852  | 8061608.141 | 17,86                   | 33                        | 33                     | 33                             | 0                              | 0.00           | Sin Incidencia  | 0                           | 0                                      | 0                                      |
| PAU_02 | 415093.629  | 8061963.629 | 9.07                    | 41                        | 41                     | 41                             | 0                              | 0.00           | Sin Incidencia  | 0                           | 0                                      | 0                                      |
| PAU_03 | 414726.204  | 8062240.982 | 16,77                   | 52                        | 52                     | 52                             | 0                              | 0.00           | Sin Incidencia  | 2                           | 2                                      | 0                                      |
| TIT_01 | 412244.264  | 8091134.262 | 11,29                   | 49                        | 49                     | 44                             | 5                              | 10.20          | Incidencia Baja | 0                           | 0                                      | 0                                      |
| PUR_01 | 406899.922  | 8090667.387 | 11,22                   | 71                        | 71                     | 60                             | 11                             | 15.49          | Incidencia Baja | 0                           | 0                                      | 0                                      |
| ALT_01 | 427979.214  | 8058003.932 | 25,15                   | 89                        | 89                     | 74                             | 15                             | 16.85          | Incidencia Baja | 0                           | 0                                      | 0                                      |
| PIC_01 | 431536.478  | 8067898.727 | 12,45                   | 64                        | 63                     | 50                             | 13                             | 20.63          | Incidencia Baja | 1                           | 1                                      | 0                                      |
| PUP_01 | 432086.004  | 8063028.669 | 17,78                   | 74                        | 72                     | 56                             | 16                             | 22.22          | Incidencia Baja | 2                           | 2                                      | 0                                      |
| JUC_01 | 424186.339  | 8084548.231 | 15,64                   | 45                        | 43                     | 32                             | 11                             | 25.58          | Incidencia Baja | 2                           | 1                                      | 1                                      |
| CON_01 | 415141.068  | 8083430.842 | 13,55                   | 55                        | 55                     | 40                             | 15                             | 27.27          | Incidencia Baja | 0                           | 0                                      | 0                                      |
| CAR_01 | 419567.831  | 8074730.684 | 8,56                    | 61                        | 60                     | 43                             | 17                             | 28.33          | Incidencia Baja | 1                           | 1                                      | 0                                      |

**Anexo A (Continuación)**

*Conteo Total de Árboles con y sin “nudo negro” por Parcela*

| Código       | Coordenadas |             | Severidad ponderada (%) | Total de árboles contados | Total de árboles vivos | N° de árboles sin “nudo negro” | N° de árboles con “nudo negro” | Incidencia (%) | Clasificación    | N° total de árboles muertos | N° de árboles muertos sin “nudo negro” | N° de árboles muertos con “nudo negro” |
|--------------|-------------|-------------|-------------------------|---------------------------|------------------------|--------------------------------|--------------------------------|----------------|------------------|-----------------------------|--|--|
|              | x           | y           |                         |                           |                        |                                |                                |                |                  |                             |  |  |
| QUE_02       | 419212.177  | 8052373.196 | 29,08                   | 84                        | 81                     | 49                             | 32                             | 39.51          | Incidencia Media | 3                           | 3                                      | 0                                      |
| COR_01       | 423956.547  | 8077649.859 | 12,86                   | 49                        | 47                     | 28                             | 19                             | 40.43          | Incidencia Media | 2                           | 2                                      | 0                                      |
| BUA_01       | 431323.886  | 8076955.176 | 12,96                   | 39                        | 39                     | 17                             | 22                             | 56.41          | Incidencia Media | 0                           | 0                                      | 0                                      |
| VIL_01       | 423869.616  | 8079593.776 | 15,94                   | 84                        | 84                     | 36                             | 48                             | 57.14          | Incidencia Media | 0                           | 0                                      | 0                                      |
| LAR_01       | 431810.535  | 8073458.172 | 21,18                   | 87                        | 85                     | 34                             | 51                             | 60.00          | Incidencia Media | 2                           | 1                                      | 1                                      |
| LAR_02       | 431914.217  | 8073031.681 | 24,83                   | 88                        | 87                     | 29                             | 58                             | 66.67          | Incidencia Media | 1                           | 0                                      | 1                                      |
| CHU_01       | 416407.08   | 8075711.5   | 21,87                   | 43                        | 43                     | 13                             | 30                             | 69.77          | Incidencia Alta  | 0                           | 0                                      | 0                                      |
| CHI_02       | 416711.553  | 8075040.265 | 14,87                   | 63                        | 61                     | 14                             | 47                             | 77.05          | Incidencia Alta  | 2                           | 0                                      | 2                                      |
| CHU_02       | 415668.808  | 8075239.514 | 17,77                   | 64                        | 64                     | 11                             | 53                             | 82.81          | Incidencia Alta  | 0                           | 0                                      | 0                                      |
| CHI_01       | 416777.3    | 8075223     | 25,12                   | 45                        | 45                     | 2                              | 43                             | 95.56          | Incidencia Alta  | 0                           | 0                                      | 0                                      |
| <b>Total</b> |             |             |                         | <b>1588</b>               | <b>1565</b>            | <b>1059</b>                    | <b>506</b>                     | <b>32.33</b>   | -                | <b>25</b>                   | <b>20</b>                              | <b>5</b>                               |

## Anexo B

Tabla Resumen del Análisis Molecular del "nudo negro" de la Queñoa

| Código de la muestra | Coordenadas |             | Longitud de la secuencia | Porcentaje de identidad (%)* |
|----------------------|-------------|-------------|--------------------------|------------------------------|
|                      | x           | y           |                          |                              |
| 25TAC11_04-ITS1      | 416886.8723 | 8075346.927 | 516                      | 100 %                        |
| 25TAC08_03-ITS1      | 430616.5033 | 8078088.18  | 515                      | 100 %                        |
| 25TAC39_02-ITS1      | 416334.1236 | 8075442.573 | 519                      | 100 %                        |
| 25TAC49_01-ITS1      | 415254.613  | 8062028.764 | 519                      | 100 %                        |
| 25TAC55_02-ITS1      | 415067.2157 | 8083296.741 | 519                      | 100 %                        |
| CHI_01_12            | 416774.011  | 8075229.849 | 520                      | 100 %                        |

Nota. \*Porcentaje de identidad en alineamiento a la secuencia de *Paraleptosphaeria polylepidis* con código de acceso MK795714.1

## Anexo C

Resultados de Alineamiento de la Secuencia "CHI\_01\_12" en BLAST

[< Edit Search](#)
[Save Search](#)
[Search Summary](#)

[How to read this report?](#)
[BLAST Help Videos](#)
[Back to Traditional Results Page](#)

Job Title: **Nucleotide Sequence**

RID: [G0E7PC2T015](#) Search expires on 10-29 11:31 am [Download All](#)

Program: BLASTN [Citation](#)

Database: core\_nt [See details](#)

Query ID: lcl|Query\_8112573

Description: None

Molecule type: dna

Query Length: 535

Other reports: [Distance tree of results](#) [MSA viewer](#)

**Filter Results**

Organism only top 20 will appear  exclude

Type common name, binomial, taxid or group name

[+ Add organism](#)

Percent Identity:  to

E value:  to

Query Coverage:  to

[Filter](#) [Reset](#)

**Descriptions** | [Graphic Summary](#) | [Alignments](#) | [Taxonomy](#)

**Sequences producing significant alignments** [Download](#) [Select columns](#) Show

select all 100 sequences selected

| Description   | Scientific Name                       | Max Score | Total Score | Query Cover | E value | Per. Ident | Acc. Len | Accession                  |
|---|---------------------------------------|-----------|-------------|-------------|---------|------------|----------|----------------------------|
| <a href="#">Paraleptosphaeria polylepidis voucher APA-2999 internal transcribed spacer 1, partial sequence; 5.8S ribosomal...</a>   | <a href="#">Paraleptosphaeri...</a>   | 977       | 977         | 100%        | 0.0     | 99.44%     | 564      | <a href="#">MK795714.1</a> |
| <a href="#">Paraleptosphaeria polylepidis MA Funcoi 57843 ITS region, from TYPE material</a>  | <a href="#">Paraleptosphaeri...</a>   | 843       | 843         | 89%         | 0.0     | 98.13%     | 500      | <a href="#">NR_119469</a>  |
| <a href="#">Leptosphaeria sp. OTU880 internal transcribed spacer 1, partial sequence; 5.8S ribosomal RNA gene and internal...</a>   | <a href="#">Leptosphaeria sp...</a>   | 736       | 736         | 95%         | 0.0     | 92.76%     | 568      | <a href="#">GU934536.1</a> |
| <a href="#">Coniothyrium vermsdorffiae culture CBS_150_34 strain CBS_150_34 small subunit ribosomal RNA gene, partial seq...</a>    | <a href="#">Coniothyrium ve...</a>    | 734       | 734         | 96%         | 0.0     | 92.56%     | 1458     | <a href="#">MH855474.1</a> |
| <a href="#">Pleosporales sp. bc_0967a internal transcribed spacer 1, partial sequence; 5.8S ribosomal RNA gene and int...</a>       | <a href="#">Pleosporales sp...</a>    | 732       | 732         | 95%         | 0.0     | 92.73%     | 546      | <a href="#">KF428332.1</a> |
| <a href="#">Peizizomycolina sp. strain Y49 small subunit ribosomal RNA gene, partial sequence; internal transcribed spacer 1...</a> | <a href="#">Peizizomycolina sp...</a> | 732       | 732         | 96%         | 0.0     | 92.56%     | 602      | <a href="#">MF615052.1</a> |
| <a href="#">Uncultured Monodictys clone D329A_1_2 18S ribosomal RNA gene, partial sequence; internal transcribed spacer...</a>      | <a href="#">uncultured Mono...</a>    | 730       | 730         | 95%         | 0.0     | 92.56%     | 607      | <a href="#">JQ346998.1</a> |
| <a href="#">Uncultured Phoma clone D300_1_1 internal transcribed spacer 1, partial sequence; 5.8S ribosomal RNA gene an...</a>      | <a href="#">uncultured Phoma</a>      | 730       | 730         | 95%         | 0.0     | 92.56%     | 568      | <a href="#">JQ346846.1</a> |
| <a href="#">Monodictys arctica strain F38 small subunit ribosomal RNA gene, partial sequence; internal transcribed spacer 1...</a>  | <a href="#">Monodictys arctica</a>    | 730       | 730         | 95%         | 0.0     | 92.72%     | 583      | <a href="#">PX108392.1</a> |
| <a href="#">Uncultured Ochrocladostrium clone D2183ITS small subunit ribosomal RNA gene, partial sequence; internal tran...</a>     | <a href="#">uncultured Ochro...</a>   | 730       | 730         | 96%         | 0.0     | 92.41%     | 630      | <a href="#">MK407952.1</a> |

## Anexo D

### Resolución Directoral de Permiso de Investigación



#### RESOLUCIÓN DIRECTORAL

##### VISTOS:

La solicitud s/n, registrada con número de expediente 2024-0057583, de fecha 26 de noviembre de 2024, contenida con solicitud de autorización con fines de investigación científica de flora silvestre, con estudios moleculares, fuera de áreas naturales protegidas (ANP), presentada por la señora **YARINA YSABEL FLORES RAMOS** (la administrada), de nacionalidad peruana, identificada con DNI N° 76984408, investigadora de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, así como, el Informe Técnico N° D000029-2025-MIDAGRI-SERFOR-DGSPFFS-DGSPF de fecha 21 de enero de 2025, y;

##### CONSIDERANDO:

Que, el artículo 66° de la Constitución Política del Perú de 1993 establece que los recursos naturales, renovables y no renovables, son patrimonio de la Nación; y el Estado es soberano en su aprovechamiento;

Que, el artículo 9° de la Ley N° 26921, Ley Orgánica para el aprovechamiento sostenible de los Recursos Naturales, establece que el Estado promueve la investigación científica y tecnológica sobre la diversidad, calidad, composición, potencialidad y gestión de los recursos naturales. Promueve, asimismo, la información y el conocimiento de los recursos naturales. Para estos efectos, podrán otorgarse permisos para investigación;

Que, mediante el artículo 13° de la Ley N° 29763, Ley Forestal y de Fauna Silvestre, se creó el Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre - SERFOR, como un organismo público técnico especializado con personería jurídica de derecho público interno, como pliego presupuestal adscrito al Ministerio de Agricultura, actualmente el Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego; artículo en el que además 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, constituyendo 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 precitada Ley N° 29763, Ley Forestal y de Fauna Silvestre, declara de interés nacional realizar 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, según lo dispuesto por el artículo 140° de la Ley en mención, señala que el SERFOR evalúa y otorga la autorización para extracción de recursos forestales y de fauna silvestre con fines de investigación científica cuando: (i) se incluye especies

Esto es una copia sujeta a verificación del documento electrónico archivado en el Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre, de acuerdo lo dispuesto por el Art. 23 de D.L. 070-2002-PCM y la Tercera Disposición Complementaria Final del D.L. 008-2016-PCM. Su autenticidad e integridad pueden ser corroboradas a través de la siguiente dirección web: [URL: https://pds.serfor.gob.pe/validadorDocumental/](https://pds.serfor.gob.pe/validadorDocumental/) Clave: PKTWL02



#### RESOLUCIÓN DIRECTORAL

**MATERIA :** Rectificación del error material contenido en la Resolución Directoral N° D000018-2025-MIDAGRI-SERFOR-DGSPFFS-DGSPF de fecha 21 de enero de 2025.

**ADMINISTRADA:** YARINA ISABEL FLORES RAMOS.

##### VISTOS:

Resolución Directoral N° D000018-2025-MIDAGRI-SERFOR-DGSPFFS-DGSPF de fecha 21 de enero de 2025 y el Informe Técnico N° D000054-2025-MIDAGRI-SERFOR-DGSPFFS-DGSPF de fecha 03 de febrero de 2025, y;

##### CONSIDERANDO:

Que, el artículo 13° de la Ley N° 29763, crea el Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre - SERFOR, como un organismo público técnico especializado, con personería jurídica de derecho público interno, como pliego presupuestal adscrito al Ministerio de Agricultura y Riego. Asimismo, 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, mediante la Resolución Directoral N° D000018-2025-MIDAGRI-SERFOR-DGSPFFS-DGSPF de fecha 21 de enero de 2025, se resolvió otorgar la Autorización con fines de investigación científica de flora silvestre, con estudios moleculares, fuera de áreas naturales protegidas a favor de la administrada;

Que, obstante, por un error involuntario se consignó el nombre de la administrada como **YARINA YSABEL FLORES RAMOS**, debiendo ser **YARINA ISABEL FLORES RAMOS**.

Que, asimismo, mediante solicitud registrada con fecha 08 de enero de 2025, la administrada señala que en la solicitud inicial omitió las comillas en una parte del título de la investigación, requiriendo la corrección respectiva, de la siguiente manera:

##### Dice:

Distribución, incidencia y caracterización morfológica y molecular del nudo negro de la queñoa (*Polylepis tarapacana*) en el departamento de Tacna

##### Debe Decir:

Distribución, incidencia y caracterización morfológica y molecular del "nudo negro" de la queñoa (*Polylepis tarapacana*) en el departamento de Tacna

Esto es una copia sujeta a verificación del documento electrónico archivado en el Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre, de acuerdo lo dispuesto por el Art. 23 de D.L. 070-2002-PCM y la Tercera Disposición Complementaria Final del D.L. 008-2016-PCM. Su autenticidad e integridad pueden ser corroboradas a través de la siguiente dirección web: [URL: https://pds.serfor.gob.pe/validadorDocumental/](https://pds.serfor.gob.pe/validadorDocumental/) Clave: WCTU008

## Anexo E

### Fotografía del Camino hacia el Área de Estudio

