

FACULTAD DE INGENIERÍA

Escuela Académico Profesional de Ingeniería Ambiental

Tesis

**Influencia de la variabilidad climática en el
crecimiento radial de *POLYLEPIS TARAPACANA*
PHILL. En Chiluyo - Tacna**

Doris Bianca Crispin De La Cruz

Para optar el Título Profesional de
Ingeniera Ambiental

Huancayo, 2021

Repositorio Institucional Continental
Tesis digital



Esta obra está bajo una Licencia "Creative Commons Atribución 4.0 Internacional" .

ASESOR

Janet Gaby Inga Guillén

COASESOR

Edilson Jimmy Requena Rojas

AGRADECIMIENTOS

Esta tesis es el fruto de un esfuerzo conjunto que involucró a: Edilson Jimmy Requena Rojas del Laboratorio de Dendrocronología de la Universidad Continental; Mariano Morales del -IANIGLA de Argentina; Laia Andreu Hayles del Observatorio de la Tierra Lamont Doherty de la Universidad de Columbia-Estados Unidos; Duncan Christie del Laboratorio de Dendrocronología y Cambio Global de la Universidad Austral de Chile, asimismo a mi asesora Janet Gaby Inga Guillén, a quienes agradezco por los conocimientos transmitidos en la línea de investigación dendrocronológica, específicamente la fabulosa “dendroclimatología”.

De la misma manera, agradezco de todo corazón a mi numerosa familia por su apoyo, comprensión y presión constante: a mis padres Jaime e Isabel y a mis hermanos Inocencio, Richard, Aydee, Eder, María, Yesica y Yoger; porque el simple hecho de existir, hacen que mi corta existencia sea una gran aventura. Asimismo, agradezco infinitamente a mi cuñada Dina Villena porque, en un detrás de cámaras, su nobleza hizo mucho en mí. Simplemente me queda repetir mil gracias.

A mi segunda familia: Sonia Gómez y Paúl Paucar a quienes considero como mis padres, gracias por vigilar y velar por mí, su respaldo fue de gran ayuda.

En la otra cara de la moneda, quiero agradecer a mis amigos de aventuras: Matt Alvarado, Diana Pérez, Katerin Montes y Ximena Prialé con quienes comparto el sueño de un país más justo, más intercultural. A mis colegas de la facultad: Diana Rivera, Adrián Camargo, Liset Palacios, Krisiris García, Elvis Cóndor y Yanela Ramón.

Finalmente, y no por ello menos importante, destaco y agradezco a mi mejor amigo Anthony Guerra Guerra por su apoyo multifacético; de la misma manera a mis amigos dendrocronólogos Osir Daygor y Ginette Ticse con quienes

compartí la dicha de fechar árboles. Gracias también a mis amigos investigadores: Fressia N. Ames, Harold R. Quispe y Vladimir Camel, gracias por absolver mis dudas y por compartir sus conocimientos, experiencias y la pasión por los *Polylepis*.

DEDICATORIA

A Dios, qanmi yachanki imayna kawsasqayta.

A Richard, siempre te voy a agradecer el haberme dado la oportunidad de culminar una carrera universitaria.

A mis padres, quienes no tuvieron la oportunidad de ir a la escuela; pero ahora pueden zambullirse al conocimiento científico a través de mí.

RESUMEN

Polylepis tarapacana es una especie arbórea muy resistente que se adapta a las condiciones climáticas extremas de frío y aridez, crece hasta los 5000 metros de altitud, y su distribución latitudinal varía de 16 °S a 23 °S a lo largo del altiplano de América del Sur. En las últimas décadas, esta especie ha sido utilizada ampliamente en la dendrocronología, se demuestra su alta sensibilidad a las fluctuaciones climáticas en el Altiplano de Chile, Bolivia y Argentina.

El presente trabajo tiene como objetivo determinar la influencia de la variabilidad climática regional (precipitación y temperatura) y a gran escala (El Niño, oscilación del sur) en el crecimiento radial de *P. tarapacana* en el altiplano peruano. Mediante el uso de técnicas dendrocronológicas, se desarrolló una cronología de ancho de anillos que abarcó el periodo de 1602-2015 (414 años), desarrollada a partir de 30 árboles. Se utilizaron 20 estaciones meteorológicas a partir del cual se generaron índices regionales de precipitación y temperatura (Z-score) correspondiente al periodo 1967-2015, asimismo, anomalías de la temperatura de la superficie del mar (TSM) del océano Pacífico de la región 3.4 correspondiente al periodo 1856-2015.

El análisis de correlación muestra que en el altiplano peruano, el crecimiento de *P. tarapacana* está influenciado significativamente por la precipitación en la temporada previa al año de formación del anillo, asimismo está influenciado por la temperatura regional y la TSM en el periodo actual del año de formación del anillo. En el altiplano, las temperaturas más altas aumentan la evapotranspiración, en consecuencia, reducen la disponibilidad de agua, provocando una limitación en el crecimiento radial.

Palabras claves: Altiplano peruano, ENOS, *Polylepis tarapacana*, precipitación, temperatura

ABSTRACT

Polylepis tarapacana is a very resistant tree species that adapts to cold and arid climatic conditions, grows up to 5000 meters altitude, and its latitudinal distribution varies from 16 °S to 23 °S along the South American Altiplano. In recent decades, this species has been widely used in dendrochronology, showing its high sensitivity to climatic fluctuations in the Altiplano of Chile, Bolivia, and Argentina.

The present work aims to determine the influence of regional (precipitation and temperature) and large-scale (El Niño southern oscillation) climatic variability on the radial growth of *P. tarapacana* in the Peruvian Altiplano. Using dendrochronological techniques, a ring-width chronology covering the period 1602-2015 (414 years) was developed from 30 trees. Twenty meteorological stations were used to generate regional precipitation and temperature indices (Z-score) for the period 1967-2015, as well as Pacific Ocean sea surface temperature (SST) anomalies for region 3.4 for the period 1856-2015.

The correlation analysis shows that in the Peruvian altiplano, the growth of *P. tarapacana* is significantly influenced by precipitation in the season prior to the ring formation year, as well as by regional temperature and SST in the current period of the ring formation year. In the altiplano, higher temperatures increase evapotranspiration and consequently reduce water availability, causing a limitation in radial growth.

Keywords: ENSO, peruvian Altiplano, *Polylepis tarapacana*, precipitation, temperature

PISIYACHAYNIN

Polylepis tarapacana sachacham urqkunapi chay pichqa waranqa altitud nisqankama wiñakun, chaynallataqmi paypa distribución latitudinal nisqankum chunka suqtayuyqmanta iskay chunka kimsayuyqkama. Kay qipa watakunam, kay sachamantam achka dendrocronología yachaykunata Chile, Bolivia Argentina suyukunapi ruwaranku.

Kay llamkanapiqa, munaraniku qawayta ichapas chay variabilidad climática llanapan utaqchu sasachakuymán apan kay sachacha *P. tarapacana* sutiyuqta, wak altiplano peruano nisqankupi. Yanapakuspa chay técnicas dendrocronológicas nisqankuwanmi, ruwaraniku cronología de ancho de anillos nisqankuta, kay cronología nisqankupaqa tawa pachak chunka tawayuyqmi watan (huk waranqa pichqa pachak iskayniyuq watamanta- iskay waranqa chunka pichqayuq watakama), kay cronología nisqata qispichiraniku kimsa chunka sachakunamanta. Chaynallataqmi ruwaraniku índices regionales de precipitación y temperatura (paramanta qunimantawan), iskay chunka estaciones meteorológicas nisqankumanta qispichiranikupas. Qatiqninpi, chay hatun qucha oceáno Pacífico sutiyuqman, índice TSM hurquraniku, huk waranqa pusaq pachak pichqa chunka suqtayuyq watamanta iskay waranqa chunka pichqayuq watakama.

Chay análisis de correlación nisqankuqa qawachiwaranku kaykunata: Qayna wata achka paratinmi kay *P. tarapacana* allinta wiñakusqa. Ichaqa kay wata *P. tarapacana* wiñaptinmi quñipas yanapan *P. tarapacana*. Altiplano nisqankupiqa, quñiqa samachin achkata *P. tarapacana* sachakunata, chaymi asllachin yakukunata, chaykunaqa sasachakuymán apan *P. tarapacana* allinta wiñakunanpaq.

Simi haykunapaq: Altiplano peruano, ENSO, para, *Polylepis tarapacana*, quñiy

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Agradecimientos.....	iii
Dedicatoria	v
Resumen.....	vi
Abstract.....	vii
Pisiyachaynin	viii
Índice de contenidos	ix
Índice de figuras	xii
Índice de tablas	xiv
Introducción.....	xv
CAPÍTULO I PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO	18
1.1. Planteamiento y formulación del problema.....	18
1.1.1. Planteamiento del problema	18
1.1.2. Formulación del problema.....	19
1.1.3. Objetivos	19
1.2. Justificación e importancia	20
1.2.1. Justificación	20
1.2.2. Importancia	20
1.3. Hipótesis de investigación	21
1.3.1. Hipótesis general	21
1.3.2. Hipótesis específicas	21
1.4. Hipótesis estadísticas.....	22
1.4.1. Hipótesis nula	22
1.4.2. Hipótesis alterna	22
1.5. Variables	22
1.5.1. Variable independiente	22
1.5.2. Variable dependiente	22
1.6. Operacionalización de variables.....	23
CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO	24
2.1. Antecedentes de la investigación.....	24
2.1.1. Artículo científico.....	24
2.1.2. Tesis	26
2.2. Bases teóricas.....	27

2.2.1. Dendrocronología.....	27
2.2.2. Género <i>Polylepis</i>	32
2.2.3. El clima en el Altiplano	38
2.3. Definición de términos básicos.....	42
2.3.1. Anillo de crecimiento	42
2.3.2. Anillo característico	42
2.3.3. Cofchado.....	42
2.3.4. Crecimiento radial	42
2.3.5. <i>Crossdating</i> - datación cruzada.....	42
2.3.6. Datación o fechado	42
2.3.7. Edad del árbol	43
2.3.8. Estandarización	43
2.3.9. EPS.....	43
2.3.10. Periodo de crecimiento	43
2.3.11. Radio.....	43
2.3.12. R_{bar}	43
2.3.13. Relación señal/ ruido.....	44
2.3.14. Sensibilidad media	44
2.3.15. Serie maestra - máster.....	44
CAPÍTULO III METODOLOGÍA.....	45
3.1. Método y alcances de la investigación	45
3.1.1. Método de la investigación.....	45
3.1.2. Alcances de la investigación	46
3.2. Esquema de investigación.....	47
3.3. Población y muestra	48
3.3.1. Población	48
3.3.2. Muestra	48
3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	48
3.4.1. Técnicas utilizadas en la recolección de datos	48
3.4.2. Ecología	49
3.4.3. Fisiografía	49
3.4.4. Caracterización climática del área en estudio.....	51
3.4.5. Colecta de muestras	52

3.4.6. Influencia de la variabilidad climática en el crecimiento de <i>P. tarapacana</i>	59
3.5. Instrumentos y materiales utilizados en la recolección de datos	60
CAPÍTULO IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	62
4.1. Resultados	62
4.1.1. Desarrollo de cronología de ancho de anillos de <i>P. tarapacana</i>	62
4.1.2. Relación entre clima y crecimiento radial de <i>P. tarapacana</i>	65
4.1.3. La influencia de TSM en el crecimiento de <i>P. tarapacana</i>	72
4.1.4. Análisis espacial entre el crecimiento de <i>P. tarapacana</i> y la TSM ...	74
4.2. Discusiones de resultados.....	75
4.2.1. Cronología de anillos de árboles y series climáticas regionales	75
4.2.2. Relación entre clima y crecimiento radial	75
4.2.3. Influencia de ENOS en el crecimiento de <i>P. tarapacana</i>	77
Conclusiones.....	78
Recomendaciones.....	79
Referencias	80
Anexos	90

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Características morfológicas de <i>P. tarapacana</i>	34
Figura 2. Características macroscópicas de <i>P. tarapacana</i> , diferencia entre duramen y albura en la sección transversal del fuste (izquierda), anillos de crecimiento (flechas negras) (derecha).	35
Figura 3. Vista microscópica de los anillos de crecimiento (arriba). Transición de la madera temprana y tardía (abajo).	36
Figura 4. Esquema de trabajo en la investigación.....	47
Figura 5. Vista panorámica del sitio de estudio (izquierdo). Árboles de <i>P. tarapacana</i> del bosque de Chiluyo (derecha).....	49
Figura 6. Mapa de ubicación del área de estudio.....	50
Figura 7. Diagrama climático de Walter-Lieth para el área de estudio, durante un año hidrológico (setiembre-agosto).....	51
Figura 8. Individuo de <i>P. tarapacana</i> muerto en pie (izquierda). Individuos multifustales vivos (derecha).....	52
Figura 9. Sección transversal de <i>P. tarapacana</i> proveniente de árbol vivo (izquierda) y muerto (derecha)	53
Figura 10. Fechado visual de una sección transversal.....	53
Figura 11. Medición de ancho de anillos	54
Figura 12. Principio básico de la dendrocronología “cross-dating”.....	55
Figura 13. Extensión de las series fechadas y cofechadas usadas para la cronología de <i>P. tarapacana</i>	62
Figura 14. Cronología de ancho de anillos de <i>P. tarapacana</i> (versión residual) en líneas negras.....	64
Figura 15. Estadísticos que evalúan la calidad de la cronología	64
Figura 16. Matriz de correlación cruzada entre 20 estaciones seleccionadas .	67
Figura 17. Coeficiente de correlación entre el crecimiento radial de <i>P. tarapacana</i> y la precipitación regional mensual (a), la temperatura regional (b) y la TSM (c).....	69
Figura 18. Variaciones temporales del índice de ancho de anillos de <i>P. tarapacana</i> con el índice de precipitación regional (noviembre a enero,	

año previo) (a), índice de temperatura regional (noviembre-marzo) (b) y TSM (setiembre a febrero).....	71
Figura 19. WTC y XWT entre el índice de ancho de anillos y TSM (septiembre - febrero).....	73
Figura 20. Campo de correlación espacial entre el crecimiento radial de <i>P.</i> <i>tarapacana</i> y la TSM de diciembre a marzo	74
Figura 21. Colecta de muestras dendrocronológicas de <i>P. tarapacana</i> en el bosque de Chiluyo, Tacna	93
Figura 22. Fechado de muestras de <i>P. tarapacana</i> en el Laboratorio de dendrocronología de la Universidad Continental-Huancayo.....	94
Figura 23. Sistema de medición de ancho de anillos de <i>P. tarapacana</i>	94
Figura 24. Muestras dendrocronológicas de <i>P. tarapacana</i> utilizados para la elaboración de la cronología	94
Figura 25. Radiograma del análisis de carbono en <i>P. tarapacana</i>	95

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Operacionalización de variables.....	23
Tabla 2. Lista de anillos marcadores identificados en la cronología.....	63
Tabla 3. Características generales de la cronología (versión residual) de <i>P. tarapacana</i>	65
Tabla 4. Características de las 20 estaciones meteorológicas seleccionadas para calcular el índice de precipitación y temperatura del altiplano correspondiente a Perú, Chile y Bolivia.	66
Tabla 5. Matriz de consistencia	91
Tabla 6. Análisis de radiocarbono de <i>P. tarapacana</i>	95
Tabla 7. Años con valores extremos (percentiles 75 y 25), correspondientes a los valores más altos y bajos para las series de tiempo para el período 1870 – 2015.....	96
Tabla 8. Anomalías de la temperatura de la superficie del mar - TSM reconstruido	98
Tabla 9. Índice de precipitación regionalizado.....	102
Tabla 10. Índice de temperatura regional	104

INTRODUCCIÓN

La compleja topografía de la Cordillera de los Andes regula la circulación atmosférica a gran escala sobre América del Sur, produciendo una diversidad de climas bien diferenciados en ambos lados de la cordillera (1; 2; 3). En los Andes centrales tropicales entre la Cordillera oriental (húmedo) y occidental (árido) se encuentra el Altiplano (15 °S - 23 °S), una meseta semiárida bastante fría y de gran altitud a más de 3.600 metros sobre el nivel del mar y un ancho promedio de 300 km (4; 5). La disponibilidad hídrica en esta región es extremadamente escasa para el consumo humano, los ecosistemas, la ganadería, la agricultura, las actividades mineras, energía hidroeléctrica y otras actividades socioeconómicas. En las últimas décadas, esta región ha experimentado tendencias persistentes de sequía e incremento de temperatura (6).

En el Altiplano peruano, la agricultura a pequeña escala es altamente vulnerable a los peligros climáticos debido a su alta exposición relacionada con la topografía montañosa y la variación climática interanual (7), las diferentes actividades socioeconómicas están amenazadas por condiciones climáticas extremas. Por ejemplo, la severa sequía de 1982-83, provocó un déficit en la producción agrícola; las frecuentes heladas han incrementado la mortalidad de animales como alpacas, llamas, ovejas (8). Estos ejemplos resaltan la extrema vulnerabilidad de la región andina peruana y sus áreas de influencia a estos severos eventos climáticos, observando una evidente necesidad de comprender la variabilidad climática y sus efectos en los Andes centrales tropicales, del cual se estima que continuarán en las próximas décadas (9).

En este contexto el estudio de la variabilidad climática sobre los Andes centrales tropicales y su vínculo con los principales patrones de circulación, como el Sistema Monzónico Sudamericano (SASM) y El fenómeno conocido como El Niño - oscilación del sur (ENOS), ha sido un tema de gran interés en la comunidad científica durante las últimas décadas (10). Sin embargo, su comprensión aún es limitada, en parte debido al corto período de registros instrumentales (que rara vez supera los 50 años) y el escaso número de estaciones meteorológicas ubicadas en grandes altitudes de las regiones

andinas. Estos registros instrumentales insuficientes, imposibilitan la elaboración de una perspectiva a largo plazo de la variabilidad hidroclimática, las tendencias en diferentes escalas de tiempo y los períodos de retorno de eventos climáticos extremos como sequías severas o pluviales. En estas condiciones, se hace complicado revelar cómo, la variabilidad climática, influye en el desarrollo de toda forma de vida en los ecosistemas altoandinos.

Por lo mencionado en el anterior párrafo, es necesario desarrollar registros paleoambientales de alta resolución a partir de anillos de árboles, esto puede resultar una herramienta muy útil para proporcionar un rango natural de un siglo de variabilidad climática, una caracterización de la evolución climática en escalas de tiempo interanuales, decenales a centenarias, asimismo, mejorar la comprensión de los efectos de los eventos climáticos en estos ecosistemas frágiles.

El género *Polylepis* está restringido a la Cordillera de los Andes, desde Venezuela hasta el norte de Argentina (11). Las diversas especies de este género de alta montaña cuentan con características adaptativas impresionantes, sobreviviendo a condiciones ambientales extremas, principalmente bajas temperaturas (12). *Polylepis tarapacana* Phill. es la especie arbórea altamente resistente a condiciones más extremas que experimentan las plantas de gran altitud: una combinación de bajas temperaturas, ambientes secos y alta irradiación (13; 14; 15; 16). En las últimas investigaciones climáticas se ha empleado la dendrocronología, donde el ancho de anillos de crecimiento anual ha generado información muy valiosa, en el cual se evidencia que el crecimiento de *P. tarapacana* está fuertemente regulado por las variaciones climáticas interanuales en el Altiplano.

El crecimiento de *P. tarapacana* es favorecido por las altas precipitaciones en los meses del verano austral en el periodo previo de crecimiento. Asimismo, en este periodo de crecimiento se encontraron correlaciones negativas con las temperaturas. En el periodo actual de formación del anillo, las condiciones relativamente cálidas, no muy lluviosas favorecen el crecimiento de esta especie. A partir de estos resultados, se ha logrado reconstruir la variabilidad hidroclimática del pasado en el Altiplano central y sur (18°S - 23°S) (17). Sin

embargo, se desconoce la influencia de la variabilidad climática en el crecimiento de *P. tarapacana* en el sitio más al norte de su distribución geográfica, donde las condiciones son más húmedas en comparación al norte de Argentina (muy árido). En este contexto, el presente estudio revela la influencia de la variabilidad climática regional y a gran escala en el crecimiento radial de *P. tarapacana* en el Altiplano peruano, usando métodos dendrocronológicos convencionales.

Esta tesis se divide en 4 capítulos, en el **capítulo I** se da a conocer el planteamiento del estudio: planteamiento y formulación del problema, los objetivos, la justificación e importancia del estudio, asimismo se plantea la hipótesis y descripción de la operacionalización de variables.

El **capítulo II** comprende el marco teórico, antecedentes de la investigación, bases teóricas de la dendrocronología: concepto, principios y aplicaciones, se presenta de manera general los estudios dendrocronológicos usando el género *Polylepis*, asimismo, se detalla el clima del altiplano. Finalmente, se presenta la definición de términos básicos.

En el **capítulo III**, se describe la metodología y el alcance de la investigación, diseño de esta, asimismo se da a conocer detalladamente el método dendrocronológico convencional.

En el **capítulo IV**, se muestran los resultados obtenidos y en seguida la discusión de estos, a través del análisis de correlación de Pearson entre el índice de crecimiento de *P. tarapacana* e índices regionales de precipitación y temperatura, asimismo, las anomalías de la temperatura de la superficie del mar (TSM) de la región 3.4. Los análisis wavelet CWT y XWT muestran la covariación en una periodicidad interanual y decadal del crecimiento de *P. tarapacana* y TSM. El análisis de correlación espacial muestra que la cronología de *P. tarapacana* captura fuertemente las variaciones de TSM.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO

1.1. Planteamiento y formulación del problema

1.1.1. Planteamiento del problema

El calentamiento en el sistema climático global es inequívoco y los impactos se evidencian en alteraciones de los regímenes de precipitación, calentamiento de la atmósfera, variaciones o incrementos en la temperatura de la superficie del mar (TSM), incremento en la ocurrencia de sequías, heladas, inundaciones, entre otros. Con la creciente evidencia de los impactos de la variabilidad y el cambio climáticos a nivel global, es probable que los efectos resultantes a escalas menores sean significativos (17).

En el Altiplano de América del Sur las precipitaciones del verano austral es el único recurso hídrico para los habitantes, la ganadería y agricultura. Varios estudios han demostrado que el fenómeno El Niño - oscilación del sur (ENOS) tiene una influencia significativa en la variabilidad interanual de las precipitaciones en esta región (18). Durante la fase cálida (El Niño) los fuertes vientos del oeste inhiben significativamente el transporte de humedad desde la cuenca del Amazonas, creando condiciones de sequía en el altiplano (2). Mientras tanto, los eventos de La Niña generan condiciones más húmedas en gran parte de los Andes tropicales (18). Estos eventos climáticos extremos amenazan toda forma de vida en el altiplano, principalmente a la población indígena, quienes no podrían subsistir sin la agricultura y ganadería.

Estudios dendroclimáticos desarrollados en el altiplano de Bolivia, Chile y Argentina utilizando *P. tarapacana* mostraron que el crecimiento de esta especie está fuertemente influenciado por la variabilidad climática local y regional (precipitación y temperatura) y a forzantes climáticos como es El Niño oscilación del sur (ENOS) (19; 15; 20).

Si bien es cierto, se conoce la relación de la variabilidad climática y el crecimiento radial de *P. tarapacana* en el altiplano de los países vecinos, en el caso del Perú los estudios dendrocronológicos son escasos (21). En el altiplano peruano se desconoce la influencia de la variabilidad climática en el sitio más al norte de la distribución geográfica de *P. tarapacana*, donde las condiciones climáticas se caracterizan por ser más húmedas (22) y en donde la influencia del ENOS es más fuerte.

1.1.2. Formulación del problema

1.1.2.1. Problema general

¿Influye la variabilidad climática en el crecimiento radial de *Polylepis tarapacana* en el bosque del Altiplano peruano de Chiluyo, Tacna?

1.1.2.2. Problemas específicos

- ¿Tiene *Polylepis tarapacana* anillos anuales claramente definidos?
- ¿Cómo influye la precipitación y temperatura regional en el crecimiento radial de *Polylepis tarapacana* en el bosque del Altiplano peruano de Chiluyo, Tacna?
- ¿Cómo influye la temperatura de la superficie del mar (TSM) de la región 3.4 en el crecimiento radial de *Polylepis tarapacana* en el bosque del Altiplano peruano de Chiluyo, Tacna?

1.1.3. Objetivos

1.1.3.1. Objetivo general

Determinar la influencia de la variabilidad climática en el crecimiento radial de *Polylepis tarapacana* en el bosque del Altiplano peruano de Chiluyo, Tacna.

1.1.3.2. Objetivos específicos

- Determinar la presencia y anualidad de los anillos de crecimiento de *P. tarapacana* en el bosque del Altiplano peruano de Chiluyo, Tacna.
- Describir la influencia de la precipitación y temperatura regional en el crecimiento radial de *Polylepis tarapacana* en el bosque del Altiplano peruano de Chiluyo, Tacna.
- Describir la influencia de la temperatura de la superficie del mar (TSM) de la región 3.4 en el crecimiento radial de *Polylepis tarapacana* en el bosque del Altiplano peruano de Chiluyo, Tacna.

1.2. Justificación e importancia

1.2.1. Justificación

1.2.1.1. En lo científico / académico

La investigación dendrocronológica de *P. tarapacana* permite el progreso de las investigaciones dendrocronológicas al completar el vacío de registros climáticos en el transecto Polo-Ecuador-Polo a través de la cordillera de los Andes.

Esta especie es un buen indicador del clima de alta resolución y exhibe algunas de las relaciones estadísticas más fuertes con los registros instrumentales (20).

1.2.1.2. En lo ambiental

El desarrollo de una cronología de ancho de anillos de *P. tarapacana* en el altiplano peruano es de gran utilidad para futuras reconstrucciones paleoclimáticas de precipitación, temperatura y eventos extremos como El Niño oscilación sur- ENOS. Además, permite ampliar el entendimiento de la variabilidad hidroclimática de los últimos 400 años en esta región (15; 23).

1.2.2. Importancia

Los bosques de *P. tarapacana* son considerados uno de los bosques más importantes de América del Sur por los múltiples servicios ecosistémicos que ofrece como la regulación hídrica, secuestro de CO₂, conservación de suelos, belleza paisajística, hábitats de flora y fauna altoandina entre otros. Estos

bosques crecen por encima de la línea de los árboles (hasta los 5.200 m s. n. m.) y en condiciones ambientales extremas de frío y aridez (24). Estas características lo hacen muy vulnerable a los efectos de la desertificación y el cambio climático (25).

En el altiplano peruano, todavía quedan muchos espacios por estudiar sobre *Polylepis*. El presente estudio pretende contribuir al conocimiento sobre la interrelación entre los factores climáticos y el crecimiento de *P. tarapacana* utilizando métodos dendrocronológicos.

La elaboración de una cronología *P. tarapacana* en el Altiplano peruano, permitirá más adelante adicionar muestras de árboles más longevos y ampliar esta cronología temporal. Una cronología robusta y longeva será de gran utilidad para realizar reconstrucciones del clima, elaborar proyecciones climáticas y estudios sobre la dinámica del bosque (regeneración, secuelas de plagas o enfermedades, etc.) (13). De esta manera, se puede determinar la presencia de periodos secos, húmedos, su ciclicidad en el tiempo y posible respuesta futura; información relevante para fines de conservación y restauración de los bosques altoandinos de *P. tarapacana* en el contexto de cambio climático.

1.3. Hipótesis de investigación

1.3.1. Hipótesis general

Existe una relación significativa entre el crecimiento de *Polylepis tarapacana* y la variabilidad climática en el Altiplano. Los anillos de crecimiento de esta especie registran las variaciones del clima a lo largo del tiempo (26).

1.3.2. Hipótesis específicas

H₁: *P. tarapacana* presenta anillos anuales claramente distinguibles.

H₂: *Polylepis tarapacana* es altamente sensible a cambios en la precipitación y temperatura regional en el bosque de Chiluyo, Tacna en el Altiplano peruano.

H₃: el crecimiento radial de *Polylepis tarapacana* es influenciado por los forzantes climáticos como El Niño oscilación del sur- ENOS. La temperatura de la superficie del mar (TSM) de la región 3.4 tiene una estrecha relación con el ancho

de anillos de *P. tarapacana* en el bosque de Chiluyo, Tacna en el Altiplano peruano.

1.4. Hipótesis estadísticas

1.4.1. Hipótesis nula

Ho: la variabilidad climática regional (precipitación y temperatura) y forzantes climáticos como El Niño oscilación del sur - ENOS no influye en el crecimiento radial de *P. tarapacana* en el altiplano peruano.

1.4.2. Hipótesis alterna

Ha: la variabilidad climática regional (precipitación y temperatura) y forzantes climáticos como El Niño oscilación del sur - ENOS influye significativamente en el crecimiento radial de *P. tarapacana*, lo cual se manifiesta en la variación del ancho de los anillos de crecimiento anual.

1.5. Variables

1.5.1. Variable independiente

- Precipitación total mensual (mm)
- Temperatura (°C)
- Temperatura de la superficie del mar- región El Niño 3.4

1.5.2. Variable dependiente

- Índice de ancho de anillo anual de *P. tarapacana*

1.6. Operacionalización de variables

Tabla 1. Operacionalización de variables

Tipos de variable	Variable	Definición conceptual	Definición operacional	Indicador	Unidad de medida	Instrumento
Independiente	Precipitación acumulada mensual	Cualquier forma de agua en estado líquido que cae de la atmósfera.	Cantidad de agua que cae de la atmósfera.	Total precipitación	Milímetro (mm)	Registro de Senamhi - Perú, Senamhi - Bolivia y Dirección Meteorológica de Chile
	Temperatura media mensual	Propiedad de los sistemas que determina si están en equilibrio térmico.	Estado de calor de la atmosfera o algún cuerpo	Promedio temperatura	Grado centígrado (°C)	Registro de Senamhi - Perú, Senamhi - Bolivia y Dirección Meteorológica de Chile
	Índice El Niño 3.4_SSTs	Calentamiento anormal del océano Pacífico ecuatorial y baja presión atmosférica en el Pacífico sur	Cambios en la temperatura superficial del mar	Temperatura superficial del mar	Grado centígrado (°C)	Registro del Climate explorer
Dependiente	Índice de ancho de anillos año a año de <i>Polylepis tarapacana</i>	Proporcionan un registro anual que reflejan las condiciones climáticas durante el crecimiento del árbol.	Distancia de un anillo a otro	Ancho de anillos	Adimensional	Equipo de medición Velmex

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la investigación

2.1.1. Artículo científico

En el año 2004, Argollo y colaboradores en su artículo científico “*Dendrocronological potential of *Polylepis tarapacana* in the Central Andes of Bolivia*” reportaron la potencialidad dendrocronológica de *Polylepis tarapacana* de las laderas de los volcanes: Soniquera, Tunupa, Sajama y Caquella . Las variaciones interanuales en los anillos de crecimiento de los árboles de *P. tarapacana* se comparó con índices regionales de precipitación y temperatura. Los resultados indican que el crecimiento radial de *P. tarapacana* está regulado por la precipitación durante el verano previo al ciclo de formación del anillo de crecimiento, en contraste, la temperatura se correlaciona negativamente con el crecimiento (19).

Posteriormente, Christie y colaboradores en su artículo “*El Niño-Southern Oscillation signal in the world's highest-elevation tree-ring chronologies from the Altiplano, Central Andes*”, manifestaron que, la formación de los anillos de crecimiento de *P. tarapacana* es inducida por las condiciones climáticas durante el período previo y actual de la temporada de crecimiento en el momento donde las influencias de ENOS son más fuertes en la costa peruana. Las variaciones en el crecimiento de los árboles muestran relaciones opuestas con el clima entre

temporadas de crecimiento consecutivas. Durante la temporada de crecimiento actual, los índices de crecimiento tienen relaciones positivas y negativas con la temperatura y la precipitación, respectivamente. Por otro lado, correlaciones significativas en el periodo actual de crecimiento con la temperatura de la superficie del mar (Niño 3.4 - SST) indican que las cronologías de *P. tarapacana* representan proxies de alta resolución extremadamente sensibles a ENOS. *P. tarapacana* representa un componente importante a considerar en futuras reconstrucciones de ENOS multiproxy (15).

Asimismo, Soliz y colaboradores, en su artículo científico titulado “*Spatio-temporal variations in Polylepis tarapacana radial growth across the Bolivian Altiplano during the 20th century*”, reportaron cronologías de *P. tarapacana*, de 110 hasta 705 años. Para determinar la importancia climática de las variaciones espaciales del crecimiento de *P. tarapacana*, los índices de crecimiento de los árboles se compararon con anomalías espaciales en la precipitación a través de la región. Los patrones uniformes de crecimiento del árbol encima (abajo) del promedio están asociados con anomalías positivas (negativo) de precipitación en el periodo previo de crecimiento. Los patrones contrastantes de crecimiento de árboles están relacionados con anomalías opuestas en la precipitación durante el año anterior en las diferentes subregiones del Altiplano. Los resultados indicaron que la red de cronologías de anillos de árboles de *P. tarapacana* en el Altiplano boliviano tienen el potencial de proporcionar reconstrucciones de precipitación resueltas anualmente en esta región durante los últimos 5-7 siglos (20).

Morales y colaboradores en su investigación titulada “*Precipitation changes in the South American Altiplano since 1300 AD reconstructed by tree-rings*” reportaron la primera reconstrucción de precipitación cuasi-milenial, basada en anillos de crecimiento anual de árboles de *P. tarapacana* en el Altiplano sudamericano. La reconstrucción de las precipitaciones (noviembre-octubre) cubrió los últimos 707 años y proporcionó un registro que caracteriza la ocurrencia de eventos extremos y oscilaciones consistentes en la precipitación. Desde la década de 1930 hasta la actualidad, una tendencia negativa persistente en la precipitación fue registrada en la reconstrucción, con los tres años más

secos desde 1300 ocurriendo en los últimos 70 años. Durante los 707 años, la reconstrucción contiene un patrón claro similar a ENOS a escalas de tiempo interanuales a multidecadales, lo que determina vínculos interhemisféricos entre la reconstrucción y otros registros sensibles a la precipitación modulados por ENOS en Norteamérica (25).

En Bolivia en el 2009, Domic y colaboradores publicaron su estudio "*P. tarapacana, ejecutado en el Volcán Sajama*" donde se estimó la velocidad de crecimiento y se evaluaron los efectos de la elevación extrema sobre el crecimiento radial de *P. tarapacana*. Asimismo, se desarrollaron diferentes modelos para predecir la relación entre la edad (número de anillos de los árboles) y los caracteres alométricos (altura y diámetro totales). Los resultados evidencian que *P. tarapacana* es una especie de crecimiento lento ya que crece de 5 mm por año. Además, la elevación tiene un efecto negativo en el crecimiento radial. Los modelos morfométricos mostraron que existe una relación positiva entre la altura total y el diámetro, pero no una relación significativa entre el número de anillos de los árboles y la morfometría. La elevación tuvo un papel importante en el crecimiento radial de *P. tarapacana* que interactúa con las condiciones microclimáticas (13).

2.1.2. Tesis

La tesis "*Influencia de los factores climáticos en el crecimiento radial de la keñua (Polylepis tarapacana) en el parque nacional Sajama*", realizado por Domic en Bolivia demostró que *P. tarapacana* forma anillos claramente distinguibles y anuales. En cuanto al análisis de función, se determinó que el factor climático limitante era la temperatura máxima, puesto que actúa de forma inversamente proporcional. Otros factores que influyeron son la temperatura media, la temperatura mínima y la temperatura máxima extrema, los cuales actúan principalmente durante comienzos y finales de la época de crecimiento, etapas donde el árbol es especialmente sensible a fluctuaciones del ambiente. El análisis de la influencia del fenómeno El Niño oscilación sur (ENOS) mostró que este por lo general, no afecta el crecimiento radial del rodal, excepto aquellos acontecidos en 1967 y 1998, en los cuales se observó una disminución drástica de la precipitación y nieve (26).

En la tesis titulada “*Estudio dendrocronológico de una población de *Polylepis rugulosa* en los Andes semiáridos de Arica y Parinacota*” se reportó una edad máxima de 200 años. Los resultados mostraron que el crecimiento radial promedio de *P. rugulosa* es de 0,708 mm/año, y la cronología abarca el periodo de 1728 - 2009. Los resultados muestran que el crecimiento de *P. rugulosa* y los registros de precipitación tienen una relación positiva, esto indica que el crecimiento de *P. rugulosa* en la población de estudio estaría parcialmente controlado por la disponibilidad hídrica durante el monzón de verano (diciembre-marzo) (27).

En la tesis de Gunderson, se hizo un primer reporte para *P. rodolfo-vasquezii* de la cordillera Huaytapallana en los Andes centrales peruanos. Se generó una cronología de 77 años, desde 1940 hasta 2016. El análisis de correlación entre los anchos de los anillos de los árboles y los datos de la estación, así como las anomalías regionales, muestran que *P. rodolfo-vasquezii* es sensible a las precipitaciones y descargas de la estación húmeda del cercano río Shullcas. La relación más fuerte con los anillos de los árboles fue la descarga tardía de la estación húmeda. Sobre la base de estas correlaciones se produjeron las primeras reconstrucciones de descargas mensuales y estacionales para el río Shullcas (28).

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Dendrocronología

2.2.1.1. Concepto

La palabra dendrocronología proviene del griego *dendron*, *crono* y *crono* que significa árbol, tiempo y conocimiento, respectivamente. Esta disciplina científica está dotada de un conjunto de principios, técnicas y métodos que permiten datar los anillos de crecimiento anuales; asimismo permite extraer, separar e interpretar la información que contienen los anillos de crecimiento de los diferentes factores que han influido en su desarrollo (29).

La dendrocronología es la ciencia que estudia los anillos de crecimiento de los árboles, su tiempo de formación y su relación con las condiciones ambientales pasadas, mediante la datación precisa de anillos anuales de

crecimiento (30). La dendrocronología es una herramienta útil para proporcionar registros a largo plazo de temperaturas pasadas, precipitaciones, incendios, brotes de insectos, dinámicas ecológicas, deslizamientos de tierra, huracanes y tormentas de hielo, por nombrar solo algunas aplicaciones (31).

2.2.1.2. Anillos de crecimiento y clima

Los anillos de los árboles están formados por el cambium vascular, un tejido celular entre la madera (xilema) y la corteza (floema). En la primera parte del período de vegetación, el cambium crea células grandes con paredes celulares delgadas (madera temprana) y, al final de la temporada de crecimiento, células estrechas con paredes celulares gruesas (madera tardía).

La variabilidad interanual del incremento radial está determinada predominantemente por el clima del período de vegetación. Dado que los anillos de los árboles reflejan en gran medida los cambios anuales del clima regional, los patrones de anillos de los árboles del mismo rodal y región climática son similares. Las series de anillos de árboles se caracterizan particularmente por los anillos estrechos que reflejan eventos climáticos cercanos al límite de tolerancia del árbol (34).

Estos anillos de crecimiento son una fuente única de información climática. El análisis de anillos de árboles ofrece una resolución de tiempo absoluta en una escala de tiempo anual o estacional y es aplicable en una gran parte del mundo, es decir, en regiones climáticas donde las plantas leñosas experimentan un período distinto de latencia debido a un frío o seco temporada (36).

2.2.1.3. Principios y nociones de la dendrocronología

2.2.1.3.1. Principio del fechado cruzado (*crossdating*)

Durante condiciones de crecimiento extremadamente desfavorables, el anillo anual solo puede desarrollarse en partes del tallo, que en un núcleo de incremento o en un disco de tallo, pueden aparecer como un "anillo faltante". Estos anillos faltantes se detectan comparando los patrones de anillos de muestras del mismo árbol y de otros árboles del mismo sitio. Este procedimiento

de cruzamiento de fechas es el principio central de la dendrocronología y asegura que todos los anillos sean reconocidos y asignados al año calendario correcto. En otras palabras, los recuentos de anillos de árboles en árboles individuales no son suficientes para su uso en dendrocronología. En general, solo las series medias de anillos de árboles que comprenden al menos diez individuos cruzados se reconocen como cronología de anillos de árboles y solo su parte bien replicada es aplicable para la datación y la investigación aplicada de anillos de árboles. El fechado cruzado implica hacer coincidir los patrones discretos de los anillos estrechos y anchos de los árboles en el mismo sitio. Este proceso proporciona control de calidad en la asignación de edades de años calendario porque, sin fecha cruzada, es probable que un simple conteo de anillos produzca un error debido a anillos falsamente localizados (36).

2.2.1.3.2. Principio de uniformitarismo

Afirma que los mismos procesos físicos y biológicos que vinculan las tendencias y procesos ambientales actuales con los patrones, también actuales, de crecimiento de los árboles funcionaron de manera similar a lo largo de la historia. El entendimiento de la forma en que influyeron estos procesos puede permitir realizar predicciones para el futuro y retropredicciones en el pasado (34).

2.2.1.3.3. Principio de factores limitantes

El ancho de los anillos de los árboles responde a un conjunto similar de factores ambientales que limitan el crecimiento de estos. Se considera a la precipitación y la temperatura como los factores climáticos más importantes en el crecimiento de un árbol, ambos repercuten sobre la disponibilidad de humedad en el suelo, la evapotranspiración y la fenología (34).

2.2.1.3.4. Principio de replicación

La cronología de un anillo de árbol tiene una fecha confiable cuando es respaldado por suficientes muestras para asegurar que la probabilidad de errores sea suficientemente pequeña (34).

2.2.1.3.5. Principio de selección de sitio

Este principio sugiere apuntar a sitios de muestra particulares y árboles que proporcionarán una señal deseada en los anchos de los anillos (34).

2.2.1.3.6. Principio de crecimiento agregado

Este principio establece que el crecimiento radial puede ser dividido en diferentes efectos agregados (32; 37). El crecimiento de los anillos (R de ring) a la edad t es una función de:

Ecuación (1). Principio de crecimiento agregado

$$R_t = A_t + C_t + \delta D1_t + \delta D2_t + \epsilon_t$$

Donde:

R_t = crecimiento del árbol en el año t

A_t = tendencia de crecimiento por la edad/tamaño

C_t = señal climática

$D1_t$ = pulsos generados por disturbios endógenos

$D2_t$ = pulsos generados por disturbios exógenos

ϵ_t = variabilidad no explicada por las anteriores señales

δ = constante que indica ausencia o presencia del disturbio

2.2.1.3.7. Noción de la amplitud ecológica

Los árboles pueden crecer y reproducirse en cierto tipo de hábitats, en relación con su capacidad para desarrollarse en diferentes ambientes (34).

2.2.1.3.8. Noción de la estandarización

El ancho del anillo de un árbol de un año dado es una expresión del balance energético de todo el árbol y sus funciones. En primera instancia, el balance energético depende del clima del período vegetativo actual. Sin embargo, el clima no solo afecta directamente al anillo del árbol, sino también a otros compartimentos del árbol como agujas, brotes anuales y raíces. El clima del período vegetativo anterior podría determinar la tasa de fotosíntesis mediante un precondicionamiento fisiológico. La estandarización es el proceso que

remueve las variaciones no deseadas de las series de tiempo medidos, dividiendo las medidas actuales por aquellas predichas de ecuaciones estadísticas derivadas y relaciona el crecimiento del árbol en el tiempo con la edad del árbol. Durante la estandarización se dividen los valores observados (ancho de anillos medidos) por los valores estimados por la función de estandarización ajustada; de esta forma una serie temporal del grosor de los anillos es transformada en una serie de índices del grosor de estos (38).

2.2.1.3.9. Noción de la sensibilidad

Variabilidad interanual en una serie temporal de anillos de crecimiento anuales, revela hasta qué punto los valores de una serie de anillos reflejan la influencia de uno o más factores causales.

2.2.1.4. Aplicación de la dendrocronología

La aplicación de la dendrocronología es múltiple, por ejemplo: la dendroarqueología sirve para la datación de monumentos arqueológicos, dendroclimatología para el desarrollo de registros de climas pasados, dendrogeomorfología, para datar eventos geomorfológicos y su movimiento, dendrohidrología para el estudio de caudales periódicos de ríos e inundaciones, dendroglaciología para el estudio de retiros y expansión de glaciares pasados, dendrovolcanología para datar erupciones volcánicas, dendroquímica para el monitoreo de la química del suelo o la salud del árbol, dendroecología para el estudio de procesos ecológicos como el movimiento de la línea de árboles, brotes de insectos y distribución de especies de árboles invasoras; dendropirocronología para estudiar y fechar eventos pasados de incendios forestales y sus impactos, dendroentomología para la reconstrucción de los niveles e impactos de la población de insectos en el pasado y la dendromastecología para la reconstrucción de ciclos de años frutales (39).

2.2.1.5. Dendroclimatología

El clima provoca el crecimiento sincrónico de los árboles y, por lo tanto, permite la datación dendrocronológica. Los anillos de los árboles y las características de los vasos son valiosos sustitutos en la evaluación de los cambios climáticos (32).

En este sentido, la dendroclimatología se ocupa de construir registros de climas y eventos climáticos pasados mediante el análisis de las características de crecimiento de los árboles y especialmente los anillos anuales. En el trabajo dendroclimatológico práctico, el árbol puede considerarse como una "caja negra" entre el parámetro climático medido en una estación meteorológica y el ancho del anillo del árbol medido en la muestra (34).

2.2.2. Género *Polylepis*

Los bosques del género *Polylepis*, endémicos en la cordillera de los Andes, se caracterizan por formar comunidades boscosas únicas que crecen a altas elevaciones del mundo a partir de los 3900 hasta los 5000 metros de altitud y tienen una extensión latitudinal de aproximadamente 5400 km desde su extremo norte (Venezuela) hasta el sur (Argentina), estas poblaciones se encuentran en lugares aislados y frecuentemente fragmentados, a veces se encuentran en simpatria compartiendo el mismo hábitat con otras especies del mismo género o con otras especies como *Buddleja*, *Clethra*, *Gynoxys*, *Podocarpus* entre otros (40; 11; 41; 42)

Estos bosques altoandinos cumplen un papel primordial en la ecología, como hábitats de muchas especies endémicas de flora y fauna, captador de CO₂ atmosférico, formación de suelo, plantas medicinales asociadas y regulador del ciclo hídrico del agua. Del mismo modo posee una relevancia sociocultural para las personas que habitan en el altiplano, quienes utilizan este recurso energético, estructural en viviendas y para actividades de agroforestería (43).

Basado en diferencias morfológicas, ecológicas y de distribución, actualmente se han reportado 35 especies del género de *Polylepis* (43; 44; 45). Entre los cuales, existen especies que crecen en condiciones muy húmedas y otros que soportan condiciones extremadamente áridas como es el caso de *P. tarapacana*. Actualmente, se estima que los bosques de *Polylepis* constituye menos del 10% de su distribución original, producto en gran parte por la influencia de las actividades antropogénicas como la tala, incendios, ganadería, entre otros (11).

2.2.2.1. Diversidad de *Polylepis* en el Perú

Del total de especies de *Polylepis* que se distribuyen a lo largo de la cordillera de los Andes, en el Perú existen 22 de ellas, de las cuales 7 son especies endémicas; ubicando a Perú en el primer lugar en diversidad de *Polylepis*, seguido de Bolivia y Ecuador (44; 12).

2.2.2.2. *Polylepis tarapacana* Phil

2.2.2.2.1. Descripción taxonómica

Reino: *Plantae*

Filo: *Tracheophyta*

Clase: *Magnoliopsida*

Orden: *Rosales*

Familia: *Rosaceae*

Nombre de taxón: *Polylepis tarapacana* Phil

Nombres comunes: queñoa de altura

2.2.2.2.2. Estado de conservación

P. tarapacana fue utilizada como fuente de carbón vegetal, madera para cocinar, material de construcción para cercos de corrales, techos, elaboración de herramientas y como planta medicinal (24; 11), estas actividades disminuyeron su población.

La *International Union for Conservation of Nature* - IUCN, ha categorizado a *P. tarapacana* como una especie **casi amenazada** (46); sin embargo, el Decreto Supremo N.º 043-2006-AG considera a *P. tarapacana* como una especie **vulnerable** (47), esta discordancia muestra que se requiere mayores estudios para una mejor evaluación. Al no disponerse de datos actualizados, la población de *P. tarapacana* se vería amenazada por las actividades antropogénicas en los próximos años.

2.2.2.2.3. Hábitat

P. tarapacana se desarrolla en zonas áridas (de 250 a 500 mm de precipitación anual), en laderas de volcanes y montañas por encima de los 4000 m s. n. m., su distribución latitudinal estrecho varía entre los 16 °S – 23 °S, a

través del altiplano correspondiente al sur peruano, Chile, Bolivia y el norte de Argentina (19).

Las condiciones climáticas extremas donde se desarrolla *P. tarapacana*, hacen que esta especie tenga adaptaciones que le permitan sobrevivir exitosamente a las bajas temperaturas y a las condiciones extremas de sequía, siendo así su crecimiento muy sensible a los cambios hidroclimáticos propios del altiplano (19). Algunas de las estrategias de afrontamiento de la especie incluyen rasgos foliares anatómicos xerofíticos (48) y la acumulación dependiente de la elevación de carotenoides y compuestos que absorben rayos ultravioletas (49).

2.2.2.2.4. Características morfológicas

P. tarapacana es un árbol pequeño de 1 a 5 m de altura, presenta hojas coriáceas con una cobertura resinosa densa en el haz y una capa muy densa de pelos cerosos amarillos en el envés, sus flores y frutos están ocultos entre las hojas. Asimismo, se caracteriza por sus ramas muy retorcidas, su corteza rojiza fibrosa desprendible en placas laminares. Las inflorescencias miden aproximadamente 1.5 cm de largo, con 1 o 2 flores, brácteas florales largas (3-5 mm) y pubescentes. Las flores poseen una simetría perfecta de 0.5-1.0 cm de diámetro, 3 sépalos, 6-14 estambres y en la base de un estilo con mechón de tricomas blancos largos. Los frutos son turbinados, cubiertos por tricomas lanudos con 3-4 costillas cubiertas por pequeñas espinas (26).



Figura 1. Características morfológicas de *P. tarapacana*. Tomada de Biodiversidad (49)

2.2.2.2.5. Fenología

P. tarapacana, no sufre la pérdida de sus hojas a lo largo de todo el año, es una especie arbórea siempreverde (23). Entre los meses de junio y julio se observan yemas florales y la floración es mayor a un 20% entre los meses de octubre y noviembre, mientras que en diciembre esta disminuye (49). Sin embargo, podría presentar una floración entre fines de junio y mediados de agosto, una formación de frutos entre mediados de agosto a fines de diciembre y la maduración de estos a partir de diciembre (52).

2.2.2.2.6. Características anatómicas de *P. tarapacana*

2.2.2.2.6.1. Descripción macroscópica

La madera de *P. tarapacana* presenta duramen de color marrón muy pálido con transición entre albura (color más claro); no se distingue olor ni sabor, su textura es fina de grano recto a inclinado, asimismo presenta un veteado tenue en arcos superpuestos y líneas paralelas. *P. tarapacana* tiene una madera dura, de lustre medio (52).

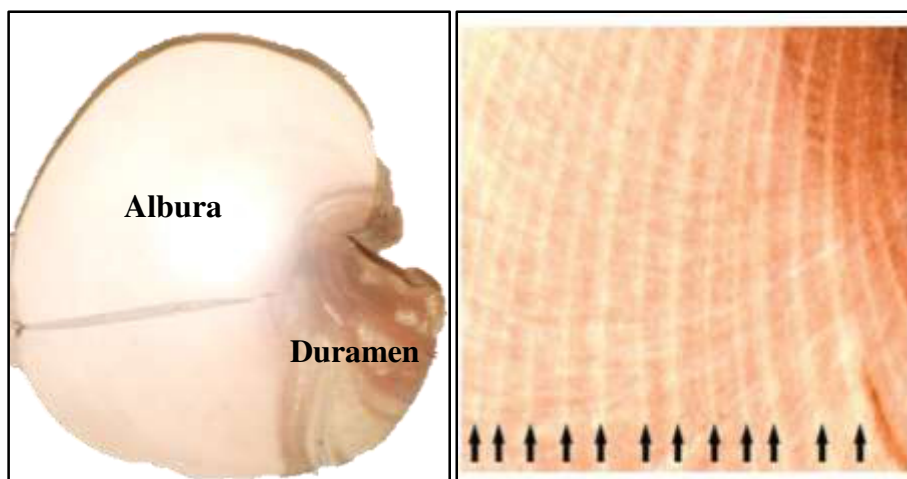


Figura 2. Características macroscópicas de *P. tarapacana*, diferencia entre duramen y albura en la sección transversal del fuste (izquierda), anillos de crecimiento (flechas negras) (derecha). Tomada de Anatomía del leño (52)

2.2.2.2.6.2. Descripción microscópica

La madera presenta anillos de crecimiento bien definidos, conformados por fibras de paredes medianas a gruesas de coloración clara (madera temprana) y fibras muy gruesas y acortadas radialmente de coloración más oscura (madera tardía). Asimismo, presenta porosidad semicircular, con poros

muy pequeños y excesivamente numerosos, predominantemente solitarios o agrupados de dos. El parénquima es apotraqueal difuso (52).

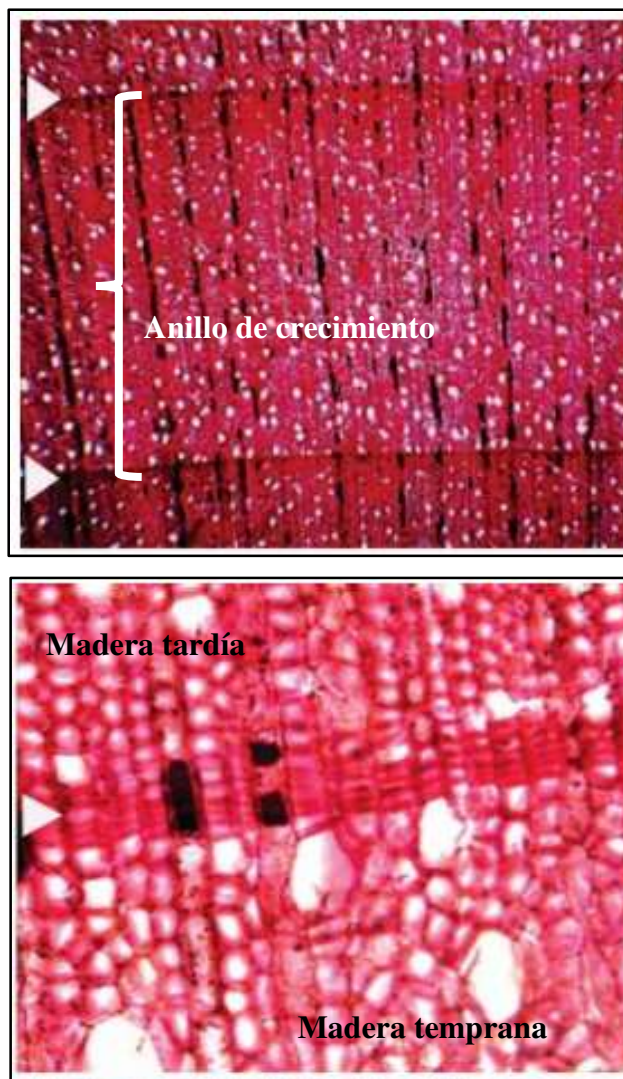


Figura 3. Vista microscópica de los anillos de crecimiento (arriba). Transición de la madera temprana y tardía (abajo). Tomada de Anatomía del leño (52)

2.2.2.3. Dendroclimatología en el género *Polylepis*

Recientemente, Requena y colaboradores reportaron el potencial dendroclimático de *Polylepis rodolfo-vasquezii*, una especie arbórea recientemente descrita en los Andes centrales del Perú entre los 4000 y 4400 m de altitud. Se describieron las características anatómicas que delimitan los anillos de crecimiento, asimismo se aplicó la dendrocronología con el objetivo de identificar el factor limitante que restringe/favorece el crecimiento de la especie. La cronología abarcó el período 1869–2015. Las estadísticas utilizadas indicaron que *P. rodolfo-vasquezii* tiene valores de Sensibilidad media, R_{bar} y EPS son similares a los mostrados por otras cronologías de *Polylepis spp.* Al parecer el

principal factor climático que controla el crecimiento de *P. rodolfo-vasquezii*, es la temperatura de la temporada de crecimiento actual (noviembre a mayo). La sensibilidad a las variaciones de temperatura interanuales destaca el potencial de *P. rodolfo-vasquezii* para proporcionar registros dendrocronológicos sensibles al clima en los Andes centrales (42; 21).

En un estudio en Perú y Bolivia, se tomaron muestras de *P. pepeii* y *P. subsericans* en las montañas de Vilcanota en la ciudad de Urubamba, y *P. rugulosa* en la región de Arequipa en la ladera del volcán Coropuna, además de *P. pepeii* cerca de la ciudad de La Paz (Bolivia). Las cronologías abarcaron 200 años y las tres especies mostraron valores intermedios de sensibilidad media, varianza común y relación señal/ruido. Los resultados revelan relaciones positivas significativas con la temperatura durante la temporada de lluvias para las tres especies en Perú y Bolivia. Las relaciones con la precipitación fueron más difíciles de interpretar, ya que, se observaron relaciones positivas entre el crecimiento radial y la precipitación al comienzo de la temporada de lluvias en las tres especies en Perú, mientras que para *P. pepeii* en Bolivia, las relaciones con la precipitación parecían estar controladas por las condiciones locales que incluyen pendiente y sustrato (27).

Por otro lado, en Ecuador, se reportó a *P. reticulata*, cuyos anillos de los árboles se caracterizaron por una porosidad de semianillos y ligeras diferencias en el grosor de la pared de fibra entre la madera tardía y la madera temprana posterior. En resumen, los resultados indicaron que el ancho del anillo de los árboles estuvo más relacionado con la temperatura que con la precipitación, y el crecimiento también se vio afectado por las condiciones del sitio y la estructura de los rodales, así como otros factores locales (46).

También se reportó *P. besseri* para el estudio de la edad y las tasas de crecimiento radial de 23 árboles de dos poblaciones en Sacha Loma (montañas Uypa y Chutu Senega). Los resultados mostraron que los árboles eran jóvenes con una edad media de 40 años y una edad máxima 63 años. Estas crecían lentamente (<1 mm / año). Por otro lado, los árboles provenientes de Chutu Senega eran más viejos y crecían más lentamente que los árboles provenientes

del sitio de Uypa. En conclusión, este estudio indica que el crecimiento radial está limitado por la acumulación de reservas el año anterior a la formación del anillo, y que un período cálido antes de la estación de crecimiento (período húmedo) puede aumentar el crecimiento de *P. besseri* (47).

Posteriormente, Roig y colaboradores reportaron la primera cronología de ancho de anillos de crecimiento de *Polylepis pepeí*. desarrollada a partir de muestras provenientes de la Puna boliviana (3700 a 4350 m de altitud). La medición de ancho de anillos de crecimiento de 29 radios, en conjunto correlacionaron a un nivel de 0.55. Esta similitud indicó que el crecimiento de *P. pepeí* en este sitio, tendría la influencia principalmente de un factor limitante. La cronología abarcó un periodo de 135 años, lo cual fue correlacionada con registros climáticos (precipitación y temperatura), donde parece ser que la temperatura del verano es el factor que más influye en el crecimiento de *P. pepeí* (48).

En Argentina, se realizó la primera cronología de *P. australis*. Con el objetivo de determinar el efecto de temperatura y la precipitación en el crecimiento radial de *P. australis* se realizó análisis de correlación entre las series climáticas y cronologías de ancho de anillos de crecimiento. Los resultados muestran una correlación significativa - positiva entre el crecimiento de *P. australis* y la temperatura de noviembre a marzo. Sin embargo, en niveles altitudinales inferiores, el crecimiento no se correlacionó significativamente con las variaciones del clima. (49). Por otro lado, Suárez y colaboradores utilizaron esta especie para estudios dendrocronológicos, se realizó una predicción de la edad en función de las condiciones del sitio y del tamaño del árbol. Los resultados indicaron que los árboles de *P. australis* rodeados de rocas crecen más lentamente que aquellos rodeados por una mayor proporción de suelo y vegetación (50).

2.2.3. El clima en el Altiplano

El altiplano, en continua ejecución desde el norte del ecuador hasta el extremo sur de Sudamérica, se extiende por más de 1000 km en dirección dominante de norte a sur a lo largo de la cordillera de los Andes (51). Debido a

su elevación y su particular topografía, representa un obstáculo formidable a la circulación troposférica (6; 22), provocando el desarrollo de regímenes de lluvia altamente diferenciados entre sus flancos oriental y occidental (3).

Además de las condiciones topográficas y su elevada altitud, provocan un clima complejo y dinámico multiescalar en el altiplano, comandadas a macro escala por el Monzón de América del Sur y sus interacciones espaciotemporales (teleconexiones) con El Niño Oscilación del Sur (ENOS), la oscilación decadal del Pacífico y la oscilación Antártica (52). Este complejo sistema océano-atmósfera, determina a su vez, la ocurrencia de lluvias sobre esta región, que aunque muestran una gran irregularidad interanual, extremadamente seca durante la mayor parte del año (inviernos secos y fríos) y un verano austral (noviembre a marzo) relativamente cálido donde las lluvias representan más del 85% de la precipitación anual, así mismo, la ocurrencia de tormentas convectivas, están asociadas al sistema del Monzón Sudamericano (SASM) (3).

En general, las condiciones climáticas en el altiplano se caracterizan por presentar bajas temperaturas, alta amplitud térmica diaria (más de 15 °C de diferencia entre el día y la noche), baja densidad del aire, alta radiación, y un clima semiárido (22).

2.2.3.1. Monzón de América del Sur (SASM)

El monzón de América del Sur - SASM consiste en reversiones estacionales en la dirección de los vientos, que causan veranos lluviosos e inviernos secos (53). A nivel global, se conocen diferentes tipos de monzones (Asia, África, entre otros), en América se conoce el monzón del norte y del sur.

SASM comprende una compleja y dinámica estructura espacial integrada principalmente por diferentes fenómenos atmosféricos, tales como el cinturón de la Alta Subtropical del Atlántico Norte (ASAN), la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), la Alta Subtropical del Pacífico Sur (ASPS), Baja Térmica del Chaco (BCH), Zona de Convergencia del Atlántico Sur (ZCAS) y los frentes atmosféricos del Sur (FS) (54).

De entre todos los fenómenos atmosféricos, se destaca la Zona de Convergencia Intertropical - ZCIT, que conduce a la formación de un cinturón de sistemas de baja presión que abarca los trópicos a nivel mundial y generalmente produce lluvias sostenidas. Este cinturón de convergencia de la superficie se forma como parte de la rama ascendente de la circulación de Hadley, un sistema circulatorio atmosférico de gran altura donde el aire se eleva al ecuador a través de la tropósfera y fluye a latitudes más altas ganando un flujo hacia el este que forma los chorros subtropicales. Esta advección masiva del aire luego desciende a la superficie cercana y regresa hacia el ecuador con un flujo hacia el oeste (vientos alisios) y así se completa el circuito. En otras palabras, la ZCIT no es estática, se mueve tanto hacia el norte como hacia el sur a través del ecuador.

Es así como, el desarrollo del SASM se inicia aproximadamente en la primavera, gracias al aumento de la convección profunda sobre el noroeste de la cuenca del Amazonas, que avanza en dirección al sureste de Brasil en el mes de noviembre cuando ocurre una permuta en la dirección de los flujos de viento del oeste a uno del este a los 200 hPa cerca de los 20 °S (55).

Finalmente, es necesario mencionar que SASM, no son más que las precipitaciones del verano austral, aquellos que se producen por una desestabilización de la tropósfera a nivel local, debido al intenso calentamiento de la superficie y el establecimiento de los vientos de altura del Este que favorecen el transporte de las masas de aire húmedo provenientes de la cuenca del Amazonas.

2.2.3.2. El Niño oscilación del sur - ENOS

ENOS es un fenómeno atmosférico-oceánico natural que ocurre en el Océano Pacífico tropical en una escala de tiempo aproximada de 2 a 7 años. Diversos estudios afirman que los eventos de ENOS están relacionados con los extremos climáticos regionales (huracanes, frecuencia y gravedad de tornados, sequías e inundaciones). ENOS se clasifica con mayor frecuencia utilizando índices que indican el calor y la frescura de las temperaturas ecuatoriales de la superficie del mar (TSM) del Océano Pacífico tropical. Otro índice de uso común

se basa en las diferencias de presión a nivel del mar medidas en todo el Océano Pacífico tropical (SOI) (56).

Los índices basados en la temperatura de la superficie del mar - TSM, se definen utilizando las TSM medias dentro de diferentes regiones del Pacífico ecuatorial. La región de Niño 1 se encuentra frente a la costa de Perú y Ecuador, mientras que la región de Niño 2 se encuentra cerca de la isla de las Galápagos. La región de Niño 3 se encuentra en el Pacífico ecuatorial central y responde mucho menos a las influencias continentales que las regiones de Niño 1 y Niño 2. La región de Niño 4 abarca parte del Pacífico ecuatorial occidental, donde las temperaturas de la superficie del mar suelen ser más cálidas. La región de Niño 3.4 se superpone a porciones de las regiones de Niño 3 y Niño 4 que cubren un área de 5 °N - 5 °S y 170 °W - 120 °W (56).

El fenómeno de ENOS tiene una influencia significativa en la variabilidad climática de baja frecuencia (interanuales e interdecadales). Durante los años de El Niño, las cálidas aguas superficiales de la costa de Ecuador y Perú conducen a lluvias torrenciales sobre los desiertos costeros (9). Sin embargo, en laderas más bajas del oeste, por encima de ~ 2000 metros de altitud generalmente no se experimenta esta afluencia de humedad relacionada con ENOS, sino se muestran efectos contrarios (2).

Las fases ENOS cálidas (El Niño) y frías (La Niña) se han asociado con extremos regionales de precipitación. Los eventos de El Niño conducen al calentamiento a gran escala, caracterizados por condiciones cálidas y secas, mientras tanto, los eventos de La Niña tienden a provocar más frío y condiciones más húmedas (57). En el Altiplano de América del Sur, los eventos de El Niño conducen a fuertes vientos del oeste sobre gran parte de los Andes tropicales que en realidad inhiben el transporte significativo de humedad desde la cuenca del Amazonas y crean condiciones de sequía en esta región. Este efecto es particularmente pronunciado en la región del Altiplano de Bolivia y el sur del Perú (6; 58).

2.3. Definición de términos básicos

2.3.1. Anillo de crecimiento

Capa de células producidas por un árbol o arbusto, usualmente en años. Conformado por una capa de células delgadas durante la época temprana de crecimiento (leño temprano) y por otra de células gruesas producidas durante la época de crecimiento tardía (leño tardío) (30).

2.3.2. Anillo característico

Anillo que se distingue de las otras por alguna particularidad en una secuencia de anillos de crecimiento evaluados visualmente. Se presenta de diferentes maneras: anillos ausentes, anillos falsos, heridas o deformaciones celulares, por presentar madera de reacción, por un aumento de conductos resiníferos, o en otros casos el primer año de un cambio brusco del crecimiento, incluso por la decoloración, etc. (30).

2.3.3. Cofechado

Control de calidad sobre medidas de ancho de anillos de un conjunto de muestras de árboles, verificando la sincronización entre las diferentes series de medidas a fechar y a la serie maestra (36).

2.3.4. Crecimiento radial

Cantidad de biomasa vegetal adicionada en el tronco de un árbol o arbusto (29).

2.3.5. *Crossdating*- datación cruzada

Interdatación, sincronización, cofechar (30).

2.3.6. Datación o fechado

Consiste en establecer las coincidencias en el grosor de los anillos u otras características de estos entre muestras de otros árboles; esto permite la identificación del año exacto en el que se formó cada anillo de crecimiento anual (30).

2.3.7. Edad del árbol

El número de años transcurridos (edad fisiológica) desde la germinación de la semilla o desde la aparición de un brote de cepa o de raíz a partir de yemas adventicias (35).

2.3.8. Estandarización

La estandarización es un proceso muy importante en la dendrocronología, que consiste en ajustar a una función cada serie individual, con el objetivo de homogeneizar la varianza entre todas las series, obteniéndose los índices de ancho de anillos (34).

2.3.9. EPS

EPS es una medida de la variabilidad común en una cronología, varía de cero a uno, el umbral recomendado para ser superado y reconocer una cronología como "robusta" es 0.85 (32; 35; 72).

2.3.10. Periodo de crecimiento

Tiempo durante el cual las condiciones climáticas son favorables para la activación del cambium, por ende el inicio de la formación de anillos en oposición a periodo de reposo o de latencia (30).

2.3.11. Radio

Serie temporal de los anillos de los árboles medido a lo largo de un solo radio, cada sección transversal debe tener 2 radios medidos (30).

2.3.12. Rbar

Rbar es el índice de correlación promedio de todos los posibles pares de muestras con una ventana de tiempo determinada. Cuanto más alto es el valor de Rbar más fuerte es la señal común, entonces menos varianza, lo que representa menos ruido (72).

2.3.13. Relación señal/ ruido

Cualquier cualidad, patrón o variación detectable en una cronología que pueda ser atribuida al clima, al ambiente, a la biología o a otras condiciones que limitan el crecimiento en grosor de los anillos (34).

2.3.14. Sensibilidad media

La Sensibilidad Media (SM) es un estadístico de calidad diseñado específicamente para analizar las variaciones en el ancho de anillos y corresponde al cambio medio de cada ancho de anillo con respecto al siguiente. Cuando las series de crecimiento analizadas son sensibles o presentan variaciones importantes, la SM toma valores mayores que cero (0 a 1), mientras que si su valor se acerca a 0 las series son más complacientes. Valores más altos indican un sitio con mejores características para estudios dendrocronológicos, sin embargo, valores superiores a 0.6 son muy raros en la información bibliográfica (34).

2.3.15. Serie maestra - máster

Patrón inicial proveniente de las mediciones en bruto de los anchos de anillos de árboles vivos que permite la interdatación de las series individuales de crecimiento radial (34). Es una cronología preliminar.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1. Método y alcances de la investigación

3.1.1. Método de la investigación

3.1.1.1. Método general

El método aplicado en este estudio fue el inductivo-deductivo. Es inductivo porque inicialmente se fue encontrando los rasgos comunes de crecimiento en los individuos de *P. tarapacana*, para llegar a la conclusión sobre la influencia de la variabilidad climática regional y a gran escala en el crecimiento radial de los árboles de *P. tarapacana* en el bosque de Chiluyo.

Es deductivo, debido a que las generalizaciones fueron puntos de partida para realizar inferencias y arribar a nuevas conclusiones lógicas para casos particulares. Por ejemplo, la premisa mayor: el clima es un factor externo que influye directamente en el desarrollo de todo tipo de ecosistemas. La tasa de crecimiento de las plantas se encuentra condicionada por la variabilidad climática (premisa menor), por tanto, el crecimiento de los árboles de *P. tarapacana* está condicionada por la variabilidad climática (conclusión) (59).

3.1.2. Alcances de la investigación

3.1.2.1. Tipo de investigación

La investigación es de tipo básica, porque se incrementan los conocimientos respecto a la dendroclimatología, especialmente la influencia de patrones climáticos regionales de temperatura y precipitación. Asimismo, el clima a gran escala como la temperatura de la superficie del mar - TSM de la región 3.4, en el crecimiento radial de *P. tarapacana* en el bosque alto andino de Chiluyo, Tacna. Los resultados obtenidos no pretenden aplicarse de manera inmediata (60).

3.1.2.2. Nivel de investigación

Según su profundidad u objetivo, la investigación es de tipo descriptivo-correlacional; ya que se describió la influencia de la variabilidad climática (temperatura, precipitación, TSM) en el crecimiento radial de *P. tarapacana* en dos periodos de crecimiento: previo y actual. Por otro lado, se estimó la correlación entre la variabilidad climática y el crecimiento radial de *P. tarapacana* mediante pruebas de hipótesis correlacionales y aplicación de técnicas estadísticas. (61).

3.1.2.3. Diseño de investigación

El diseño de la investigación es No experimental (71), no se manipularon ninguna de las variables. La información obtenida fue producto de las mediciones del ancho de anillos de *P. tarapacana* y se correlacionaron con datos climáticos instrumentales (precipitación y temperatura) y TSM (62).

3.2. Esquema de investigación

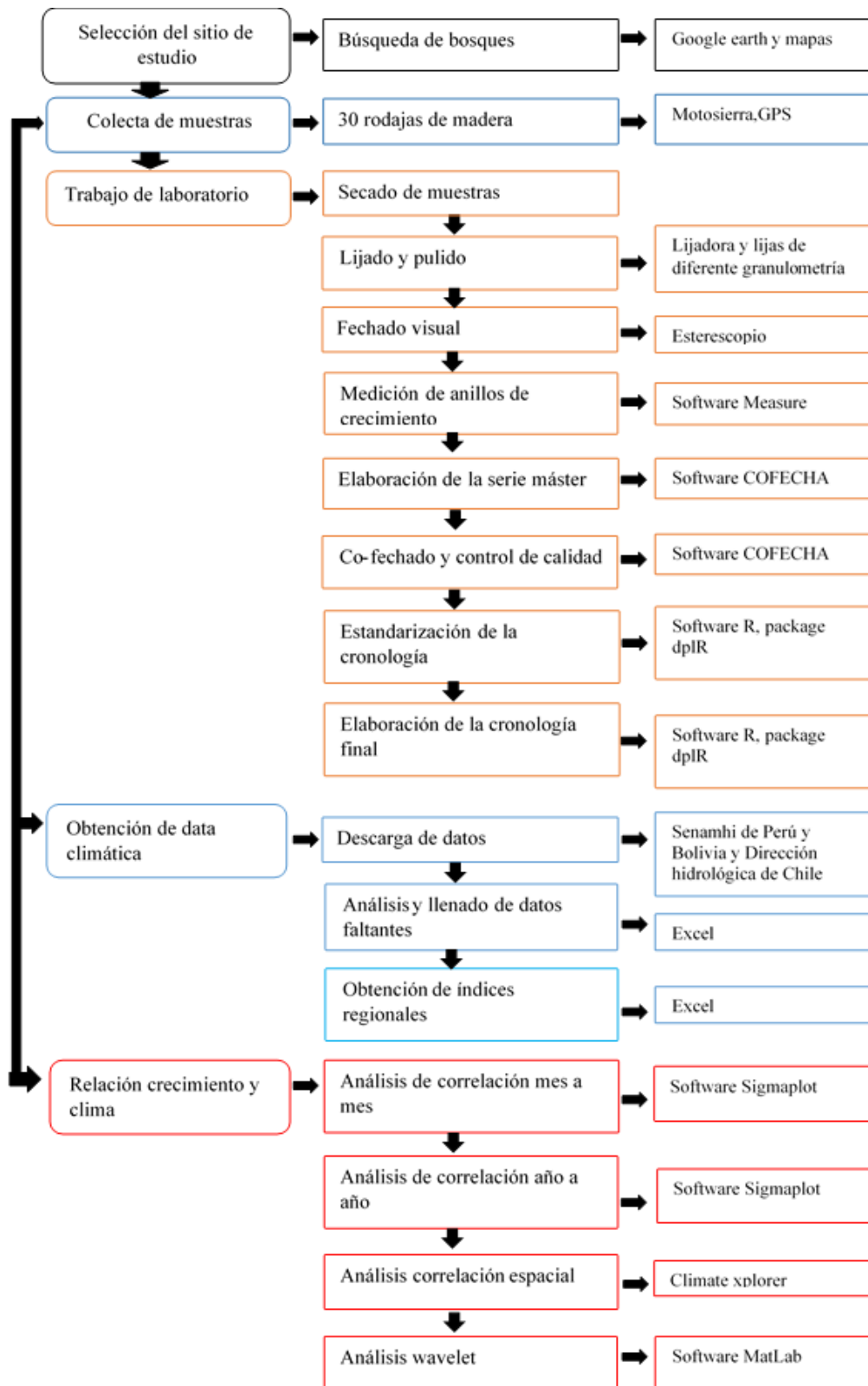


Figura 4. Esquema de trabajo en la investigación

3.3. Población y muestra

3.3.1. Población

Está conformado por el bosque de *P. tarapacana* de un área aproximada de 2.282 ha con individuos entre 100 – 400 por hectárea (63), ubicados en la localidad de Chiluyo Chico – distrito de Tarata, provincia de Tarata, departamento de Tacna en el Altiplano peruano (64).

3.3.2. Muestra

3.3.2.1. Tamaño de muestra

La muestra es no probabilística. Se seleccionaron 30 árboles, se obtuvieron muestras de árboles multifustales (muestras vivas) y árboles muertos con rasgos de longevidad.

3.3.2.2. Selección de muestra

Se seleccionaron árboles localizados en terrenos de ladera, suelos pobres y afloramientos rocosos donde la disponibilidad hídrica es mínima; estos árboles están más restringidos a la humedad y captan las aguas provenientes de la lluvia para su crecimiento. Asimismo, se seleccionaron árboles con rasgos de longevidad con el objetivo de obtener una cronología extensa en el tiempo.

3.3.2.3. Unidad muestral

La unidad muestral está representada por el ancho del anillo de crecimiento.

3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

3.4.1. Técnicas utilizadas en la recolección de datos

3.4.1.1. Delimitación del área de estudio

El área de estudio es un bosque de un área aproximada de 2.282 ha con individuos entre 100 – 400 por hectárea, ubicado en la localidad de Chiluyo a 4657 de altitud promedio (Coordenadas UTM Este: 430664.4, Norte: 80755983.8, figura 6), distrito de Tarata, provincia de Tarata, departamento de Tacna en el altiplano peruano.



Figura 5. Vista panorámica del sitio de estudio (izquierda). Árboles de *P. tarapacana* del bosque de Chiluyo (derecha)

3.4.2. Ecología

Este bosque se encuentra dentro de la región biogeográfica de la Puna xerofítica, zona semiárida caracterizada por las bajas temperaturas, que condiciona el crecimiento de la vegetación. Las familias que predominan en esta región son: *Cactaceae*, *Fabaceae*, *Zylophylaceae*, *Asteraceae* (73).

Asimismo, se puede encontrar varias especies de *Polylepis*, como *P. tormentella*, *P. besseri* y *P. tarapacana* que cubren grandes sectores del altiplano de Chile, Bolivia y pequeños sectores del sur de Perú y el norte de Argentina. Con respecto a las poblaciones de *P. tarapacana* no se encuentran fragmentados o en manchones como suceden con las otras especies de *Polylepis*. *P. tarapacana* ha sido utilizado por los pobladores andinos como utensilios, remedio, leña, etc (70).

Estos bosques altoandinos comparten hacia el norte con diversos elementos de la puna húmeda y hacia el suroeste recibe notables influencias florísticas de la puna desértica de Atacama y de los Andes mediterráneos chilenos de alta montaña (65).

3.4.3. Fisiografía

La localidad de Chiluyo se caracteriza por presentar laderas inclinadas; así como por áreas colinadas y algunas veces, de relieve suave hasta plano. Las

rocas son de orígenes sedimentario. Esta región tiene la característica de presentar suelos poco desarrollados y con poco espesor de horizontes (72).

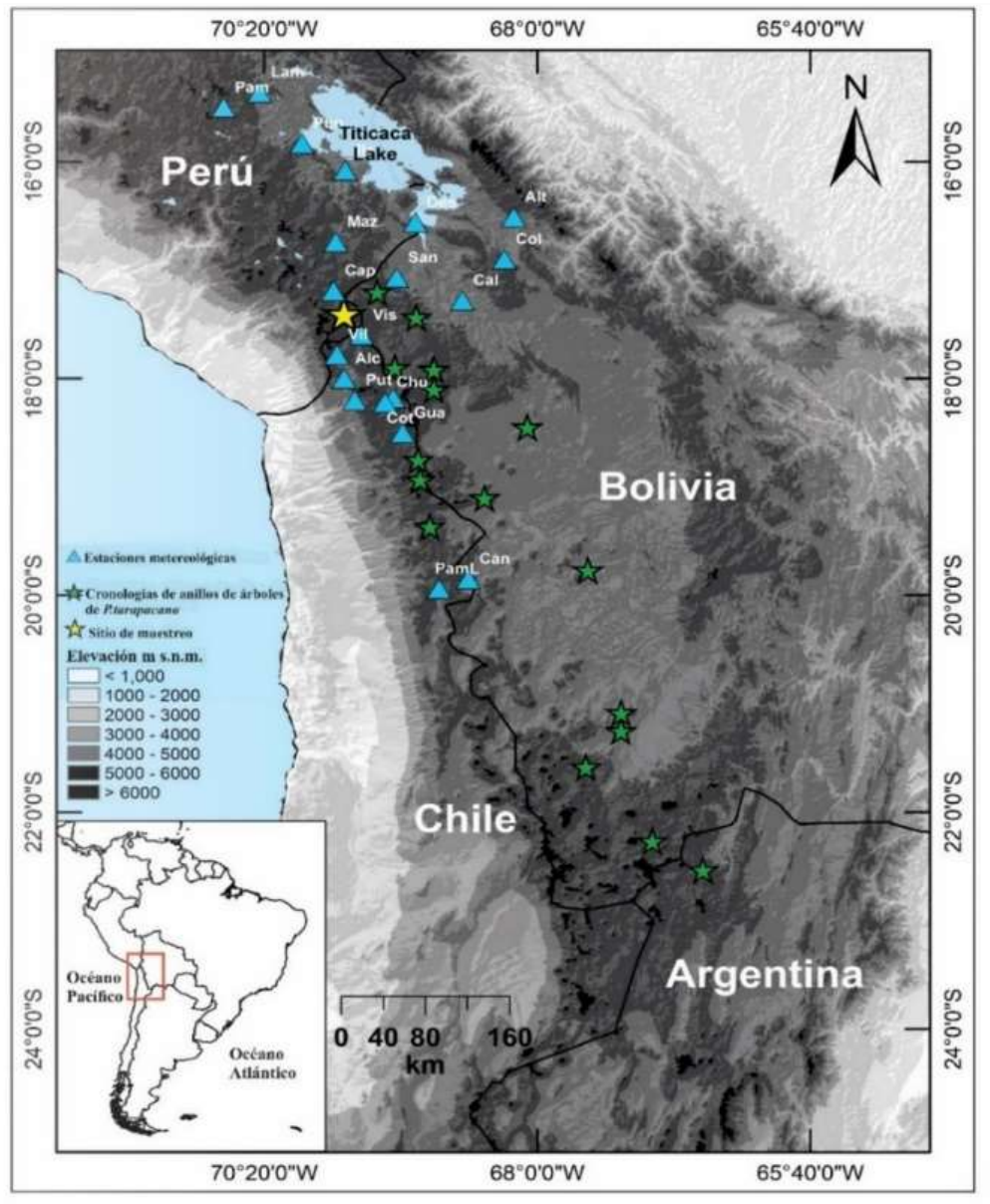


Figura 6. Mapa de ubicación del área de estudio

La estrella amarilla indica el sitio de muestreo (altiplano peruano), las estrellas de color verde indican las series dendrocronológicas de *P. tarapacana* reportadas para el Altiplano de Chile, Bolivia y Argentina. Los triángulos de color celeste indican la ubicación geográfica de las 20 estaciones meteorológicas en Perú, Bolivia y Chile utilizadas en este estudio.

3.4.4. Caracterización climática del área en estudio

Para caracterizar las variables climáticas del área de estudio, se obtuvieron datos climáticos de la estación llamada Mazocruz (Este 435157.59, Norte 4815453.64 a 4003 metros de altitud), se encuentra a 74 km en dirección noreste del área de estudio y con registros de 51 años (1964-2015).

En Chiluyo, la temperatura media anual es de 4.7 °C con temperaturas medias mínimas y máximas que van desde 0.35 °C hasta 8.08 °C en julio y enero, respectivamente. Asimismo, posee un promedio anual de amplitud térmica diaria de 21 °C.

Por otro lado, la precipitación anual total alcanza los 430 mm en promedio, tiene una distribución monodomal que varía de 2 mm en julio a 125 mm en enero. Se produce un déficit de agua entre abril y octubre, mientras que la recarga de agua ocurre de noviembre a marzo (Figura 6).

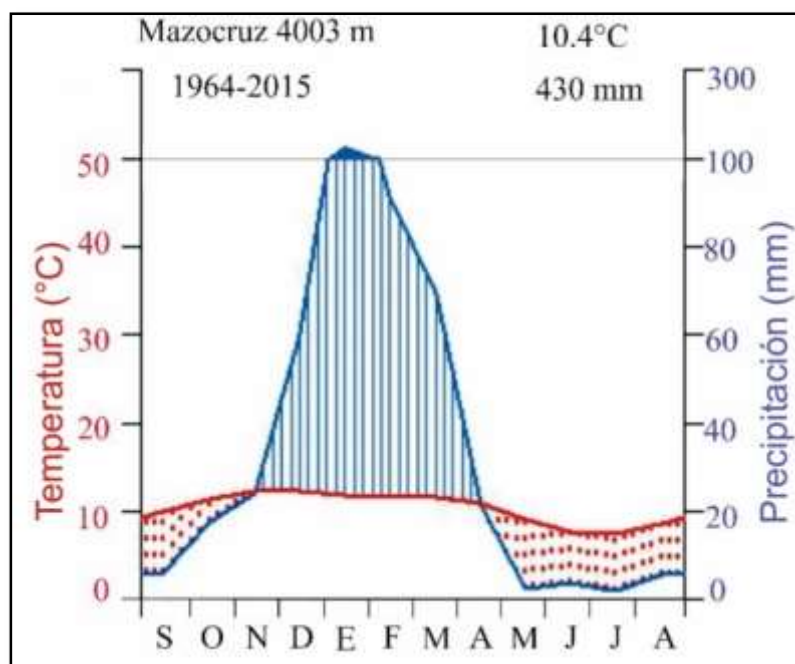


Figura 7. Diagrama climático de Walter-Lieth para el área de estudio, durante un año hidrológico (setiembre-agosto)

Las áreas oscuras sólidas representan la estación húmeda con precipitaciones mensuales ≥ 100 mm. Las áreas con puntos rojos representan la estación húmeda con precipitaciones mensuales ≥ 100 mm. Las áreas con puntos

rojos representan la estación seca. El período de humedad (líneas verticales azules) es de noviembre a marzo.

3.4.5. Colecta de muestras

En marzo de 2017, se seleccionaron 30 muestras (secciones transversales) de *P. tarapacana* de árboles vivos y muertos. Se colectaron árboles vivos provenientes de individuos multifustales y árboles muertos con rasgos de longevidad que permitan extender la cronología en el tiempo.



Figura 8. Individuo de *P. tarapacana* muerto en pie (izquierda). Individuos multifustales vivos (derecha)

3.4.5.1. Preparación de las muestras

Siguiendo los procedimientos dendrocronológicos convencionales (35), se colectaron ramas de árboles vivos y troncos de árboles muertos con ayuda de una motosierra, estas fueron codificadas indicando el sitio y el número de la muestra. Luego, se dejaron secar a temperatura ambiente por unos 15 días. Después, fueron pulidas con lijas de diferente granulometría (80 a 1500) para resaltar la estructura anatómica de los anillos de crecimiento (35).

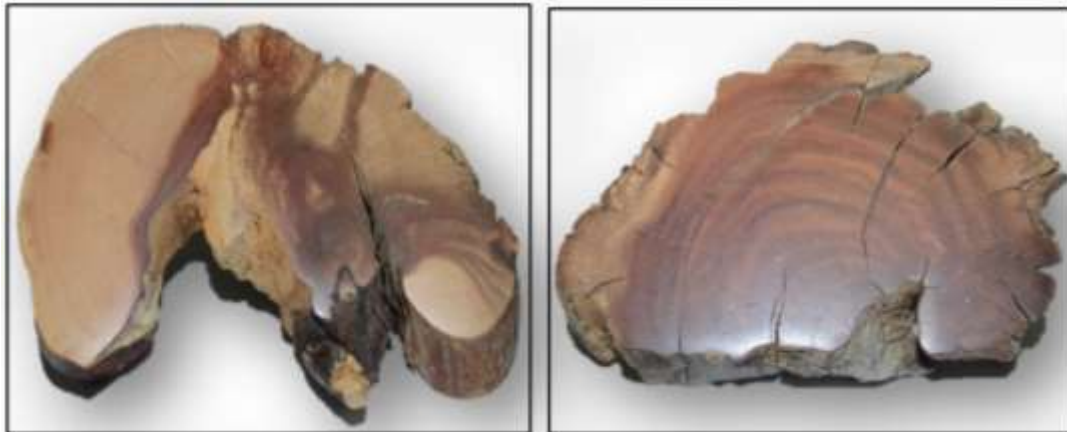


Figura 9. Sección transversal de *P. tarapacana* proveniente de árbol vivo (izquierda) y muerto (derecha)

3.4.5.2. Conteo de anillos y fechado visual

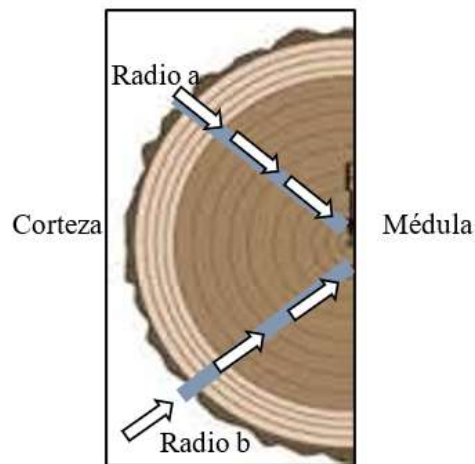


Figura 10. Fechado visual de una sección transversal

Por cada sección transversal se trazaron dos radios, los cuales fueron visualmente fechados usando anillos marcadores (anillos muy estrechos o anchos) (35; 66). Para este fin se siguió la convención de Schulman para el hemisferio sur (67), que asigna a cada anillo de árbol el año calendario en el que comenzó el crecimiento radial. Esto es importante porque la temporada de crecimiento ocurre durante la estación húmeda en partes de dos años calendario, desde octubre del año “t-1” hasta abril del año “t” (32). Por ejemplo, el último anillo completo producido durante la temporada de crecimiento 2015-2016 simplemente estaría fechado como 2015.

3.4.5.3. Construcción de la cronología de *P. tarapacana*

3.4.5.3.1. Medición de los anillos y elaboración de la serie máster

Inicialmente, se midieron todas las muestras provenientes de árboles vivos (15 muestras), dos radios por muestra. Se utilizó el sistema de medición Velmex con un micrómetro de precisión de 0.001 mm, conectado a una platina deslizante acoplada a una computadora. Para registrar y guardar las mediciones del ancho de anillo, se utilizó el software de medición MeasureJ2X (35). Los anchos de los anillos se deben medir teniendo en cuenta la orientación de sus límites en relación con la ruta (figura 11). Esto permite aumentar la precisión cuando se utilizan trayectorias rectas (para lograr resultados similares a la trayectoria perpendicular a los anchos de los anillos).

Cada una de las mediciones se fueron analizando y corrigiendo, usando el software Cofecha XP-2012 (68). Inicialmente los archivos de medición de cada muestra proveniente de árboles vivos (radio a y b) se compararon estadísticamente una con otra, si ambas radios tienen sincronía entre sí, se agregan las mediciones de otras muestras vivas y así sucesivamente. De esta manera, se obtiene una serie maestra o también llamada máster.

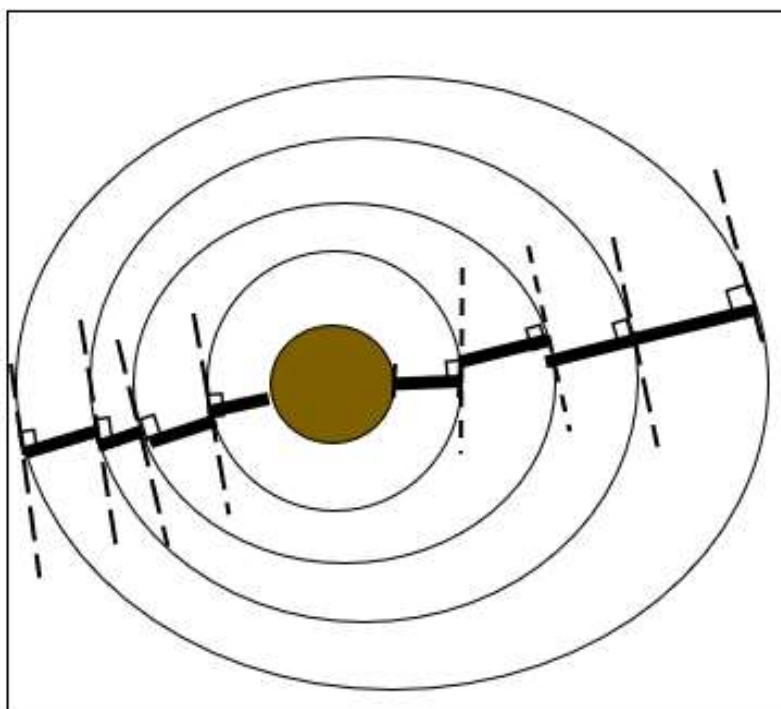


Figura 11. Medición de ancho de anillos

3.4.5.3.2. Validación estadística de la datación

La aprobación de las dataciones se realiza determinando el grado de sincronía entre las series mediante el coeficiente de correlación con un nivel de significancia del 95% y 99% con ayuda del software Cofecha (37). Luego de obtener la serie maestra, se siguen realizando las mediciones de muestras provenientes de árboles muertos (series flotantes sin fecha exacta), estas nuevas mediciones se ingresan al Cofecha para el proceso llamado “*crossdating*” (datación cruzada). En la figura 11, se tiene una serie maestra proveniente de árboles vivos (serie 1), a esta se adicionan mediciones de árboles de troncos muertos llamados series flotantes (series 2, 3 y 4) . Aquí Cofecha calcula la correlación entre cada serie flotante y la serie maestra por subperiodos de 50 años, desplazando la serie 25 años hacia atrás y adelante para buscar alguna posición que mejore el valor de correlación (74). Luego de conocer la fecha exacta de inicio y fin de la muestra, esta se agrega a la serie maestra y el proceso continúa para cualquier otra sección transversal proveniente de árboles muertos (36).



Figura 12. Principio básico de la dendrocronología “*crossdating*”. Tomada de *Dendrochronology or tree-ring dating* (75).

3.4.5.3.3. Estandarización y construcción de la cronología

Debido a que el crecimiento de un individuo puede variar incluso en árboles que crezcan en el mismo sitio, ya sea por los cambios en la tasa de crecimiento de los individuos relacionada con la edad, condiciones ambientales u otros factores, se procedió a estandarizar con el objetivo de eliminar el “ruido” de estos efectos (34).

Una vez que se midieron todas las secciones transversales y se cofecharon con éxito todas las series (60 radios), las series de anchos de anillos se estandarizaron en índices (media constante=1) con el objetivo de eliminar las tendencias biológicas propias del crecimiento (37), utilizando la biblioteca del programa de dendrocronología " dpIR " en el software estadístico R-studio (69).

El método de estandarización fue la curva exponencial negativa, este retiene los eventos de frecuencia media-baja. De esta manera, se construyeron dos versiones de cronologías de anillo: estándar y residual (70). Se eligió la cronología residual, por cumplir con los supuestos estadísticos para determinar adecuadamente las relaciones del análisis de correlación paramétrica (clima de crecimiento), también enfatiza el dominio de alta frecuencia con contenido en la serie temporal, que podría estar relacionado con el Niño 3.4 - SST (71).

Finalmente, la calidad y la intensidad de la cronología se evaluaron en función de los siguientes parámetros estadísticos: Sensibilidad media (SM), la señal de población expresada (EPS) y la correlación media entre series (R-bar) (72).

El EPS permite reconocer una cronología como "robusta", el umbral recomendado es superior a 0.85. En este caso se calculó el EPS en segmentos de 50 años, traslapados cada 15 años (32; 35; 72).

Ecuación (2). Fórmula para hallar el EPS

$$EPS(t) = \frac{(n\bar{r}_{bt})}{n\bar{r}_{bt} + (1 - \bar{r}_{bt})}$$

Donde:

\bar{r}_{bt} = correlación media entre todas las series de anillos de árbol

n = número de árboles correlacionados.

Finalmente, el R-bar varía de -1 y 1, los valores bajos o negativos son un indicador de una falta total de crecimiento común. Cuanto más alto es el valor de

Rbar más fuerte es la señal común, entonces menos varianza, lo que representa menos ruido (72).

3.4.5.4. Recopilación y análisis de series meteorológicas

Para determinar la relación entre el clima y el crecimiento radial de *P. tarapacana*, se compilaron datos mensuales de precipitación y temperatura (máxima y mínima) del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú¹, Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología de Bolivia² y la Dirección meteorológica de Chile³ para la región del altiplano entre ~15 °S y 20 °S a partir de estaciones disponibles en elevaciones altas (3545 a 4570 msnm) y cuyos datos faltantes sean < 10% (Tabla 1). Considerando los objetivos de la investigación, se calculó la precipitación mensual acumulada y la temperatura media mensual de cada estación meteorológica. Para calcular la temperatura promedio mensual se utilizó la *ecuación 3*.

Ecuación 3. Fórmula para hallar la temperatura media

$$T_{med} = (T_{max} - T_{min})/2$$

Donde:

T_{med} = temperatura media

T_{max} = temperatura máxima

T_{min} = temperatura mínima

3.4.5.5. Procesamiento y cálculo de datos faltantes

Se realizó una correlación cruzada entre los datos de las estaciones meteorológicas para buscar las correlaciones más altas entre estaciones, luego los datos faltantes de una estación “x” se completaron mediante el método de la

¹ <https://www.senamhi.gob.pe>,

² <http://senamhi.gob.bo>

³ <http://www.meteochile.gob.cl/>

regresión lineal con otra estación meteorológica que muestra la correlación más alta a un nivel de significancia del 99% (6).

3.4.5.6. Obtención de índices de precipitación y temperatura regional

Se calcularon las medias y las desviaciones estándar de cada estación meteorológica para un período común de 1984-2012 (temperatura) y 1985-2007 (precipitación), luego se calculó el índice Z – Score dividiendo la diferencia de la precipitación acumulada (temperatura media) y el promedio de la precipitación (temperatura) mensual, entre la desviación estándar de la población (33), para lo cual se utilizó la *ecuación 5*.

Ecuación 5. Fórmula para hallar el índice Z-Score

$$Z = (Xi - \mu) / \sigma$$

Z -Score indica cuántas desviaciones estándar en un valor se encuentran por encima o por debajo del promedio.

X_i : precipitación acumulada para el mes i

μ : promedio de la precipitación acumulada mensual

σ : desviación estándar

Finalmente, se generaron índices climáticos regionales (índice Z – Score) de temperatura y precipitación correspondiente al periodo de 1967-2015. Es conveniente el uso de valores estandarizados (z-scores), de este modo el peso de cada estación es equivalente, sin importar el valor original de la temperatura (en °C) o precipitación (mm) de cada estación analizada.

3.4.5.7. Obtención de la serie climática de la temperatura de la superficie del mar TSM

Con el fin de determinar la influencia de El Niño oscilación del sur (ENOS) en el crecimiento de *P. tarapacana*, se descargaron las anomalías de la temperatura de la superficie del mar reconstruido (TSM) de la base de datos de

la NOAA ERSSTv5⁴ de la región Niño 3.4 (5 °N / 5 °S, 170° / 120 °W). Los índices mensuales van desde 1856 hasta 2015.

3.4.6. Influencia de la variabilidad climática en el crecimiento de *P. tarapacana*

Con el objetivo de estudiar la relación entre los índices climáticos (precipitación regional, temperatura regional y TSM) y el índice de ancho de anillos de *P. tarapacana*, se realizó el análisis de correlación de Pearson (73).

Debido a que el crecimiento radial del árbol puede estar influenciado por las condiciones climáticas varios meses antes de la formación del anillo, se examinaron las relaciones durante un período de 24 meses a partir de junio de la temporada de crecimiento anterior (t-1) a mayo en la temporada de crecimiento actual (t) (34). Al integrar los 24 meses, se considera las condiciones climáticas durante dos estaciones de crecimiento completas.

Además, se utilizó un análisis de eventos extremos para identificar los años con valores por encima o por debajo de un umbral. Los años extremos se identificaron seleccionando la cola de las distribuciones de cada índice (temperatura, precipitación, TSM) y el índice de ancho de anillos por encima / debajo del crecimiento promedio. En la serie de tiempo, los valores que están por encima del percentil 75 (> 0.75th) y por debajo del percentil 25 (<0.25th) corresponden a extremos positivos y negativos, respectivamente.

3.4.6.1. Relación entre TSM y el índice de ancho de anillos de *P. tarapacana*

Se utilizó el análisis de coherencia wavelet (WTC) para identificar las regiones en el espacio de tiempo donde las series temporales covarían. Asimismo, se usó la transformada cruzada wavelet (XWT), para determinar si ambas series están relacionadas físicamente (74) y se usó el método Monte Carlo para evaluar la importancia estadística contra fondos de ruido rojo.

⁴ <https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.noaa.ersst.v5.html>

Estas técnicas espectrales fueron desarrolladas al seleccionar el tipo Morlet (75) y utilizando el MatLab el módulo desarrollado por (76)⁵.

Los vectores horizontales o paralelos que señalan a la derecha indica que ambos índices están en fase (relación positiva); por el contrario, cuando los vectores están para la izquierda, ambas series están en desfase (relación negativa). Los vectores verticales indican que los índices no están en fase y no se sabe si la relación es positiva o negativa (76; 77).

3.4.6.2. Análisis espacial entre TSM y el índice de ancho de anillos de *P. tarapacana*

Se realizó la correlación a gran escala, a través de una representación espacial. Este análisis de correlación espacial de la serie se realizó para la estación de crecimiento anterior (t-1) correspondiendo a los meses de diciembre-marzo durante el periodo 1870-2015 ($P < 0.001$) en KNMI *Climate explorer* (Real Netherlands Instituto Meteorológico 2015).

3.5. Instrumentos y materiales utilizados en la recolección de datos

Para la recolección de las muestras dendrocronológicas de *P. tarapacana* en el altiplano peruano, se tuvo en cuenta los siguientes instrumentos y materiales: motosierra, GPS, libreta de muestreo dendrocronológico, cámara fotográfica profesional. Asimismo, para la preparación de muestras, se utilizaron lijas de diferente granulometría (80 a 1500), lijadora de banda y máquina pulidora.

Para la construcción de la cronología se usó un estereomicroscopio y computadora. También se utilizaron los siguientes softwares: *Cofecha*, *Mesurare*, *Arstan*, *R package Dplr*.

Finalmente, para la obtención de la data de precipitación y temperatura se utilizaron registros meteorológicos de 20 estaciones, provenientes de Senamhi -

⁵ <http://www.pol.ac.uk/home/búsqueda/waveletcoherence>

Perú, Senamhi - Bolivia y de la Dirección meteorológica de Chile. Asimismo, se obtuvo la data de las anomalías de la temperatura superficial del mar del Pacífico reconstruido (TSM) de la base de datos de la NOAA ERSSTv5 de la región Niño 3.4 (5 °N / 5 °S, 170° / 120 °W). Para el procesamiento de estos datos se utilizó el software Excel, Sigmaplot, MatLab, Rstudio.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Resultados

4.1.1. Desarrollo de cronología de ancho de anillos de *P. tarapacana*

Para corroborar la hipótesis 1, se utilizó el software Cofecha, el cual compara estadísticamente (r de Pearson) el fechado de cada una de las muestras con un nivel de significación del 95% y 99%. Las 30 muestras pasaron por esta prueba, así se obtuvo 60 radios fechados y cofechados correctamente (Figura 12).

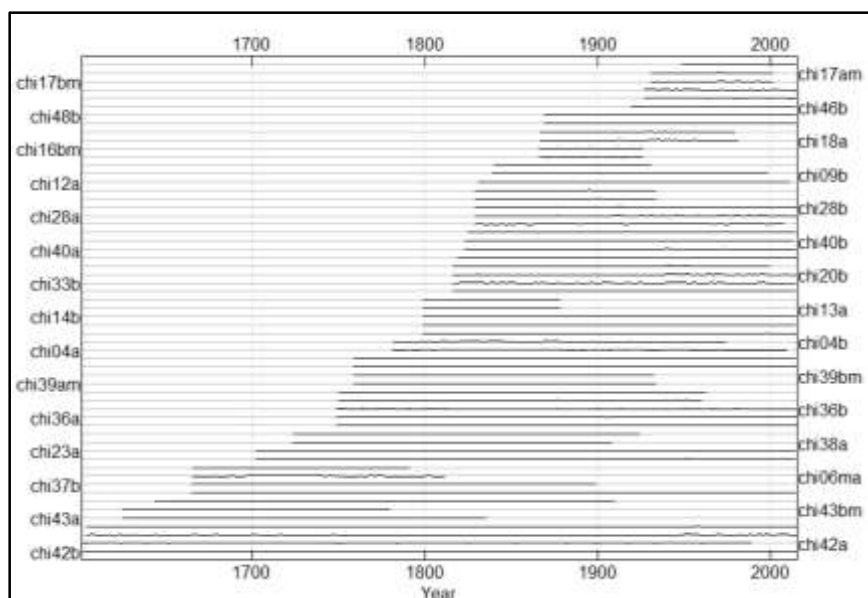


Figura 13. Extensión de las series fechadas y cofechadas usadas para la cronología de *P. tarapacana*

Con respecto a la edad, se encontraron 2 árboles relativamente jóvenes (61 y 66 años) y 2 árboles muy longevos (411 y 414 años); la mayoría de las muestras se encontraban alrededor de los 180 años (figura 13).

Asimismo, el fechado visual de las muestras reveló que compartían un patrón similar (anillos anchos o estrechos coinciden en los mismos años). Este patrón es un indicador de la existencia de un factor que afectó predominantemente el crecimiento de los árboles y fue común en todo el bosque. En esta cronología, se identificó 50 anillos marcadores (anillos muy estrechos y anchos).

Tabla 2. Lista de anillos marcadores identificados en la cronología.

Anillos marcadores	Años
	1992,1983,1967,1961,1936,1916,1917,1892,1890,
Anillos estrechos	1863,1847,1836,1835,1815,1809,1778,1766,1749, 1743,1742,1725,1724,1696,1674
	2009,1997,1987,1982,1972,1965,1958,1957,1951,1950,
Anillos Anchos	1945,1940,1939,1930,1923,1918,1896,1888,1877,1866, 1845,1824,1813,1803,1799,1791

Esta cronología en su versión residual se desarrolló a partir de 60 series (profundidad de fondo celeste), el método de estandarización usado fue la curva exponencial negativa, para suavizar se utilizó una línea curva (*spline*) de 30 años (línea roja) (Figura 14). La cronología de ancho de anillos de *P. tarapacana* abarca un periodo de 414 años, sin embargo, aunque la cronología cubre el período 1602-2015, solo desde el año 1674 la cronología se replica con más de 10 series y a partir de esta fecha es confiable y robusta (Figura 14).

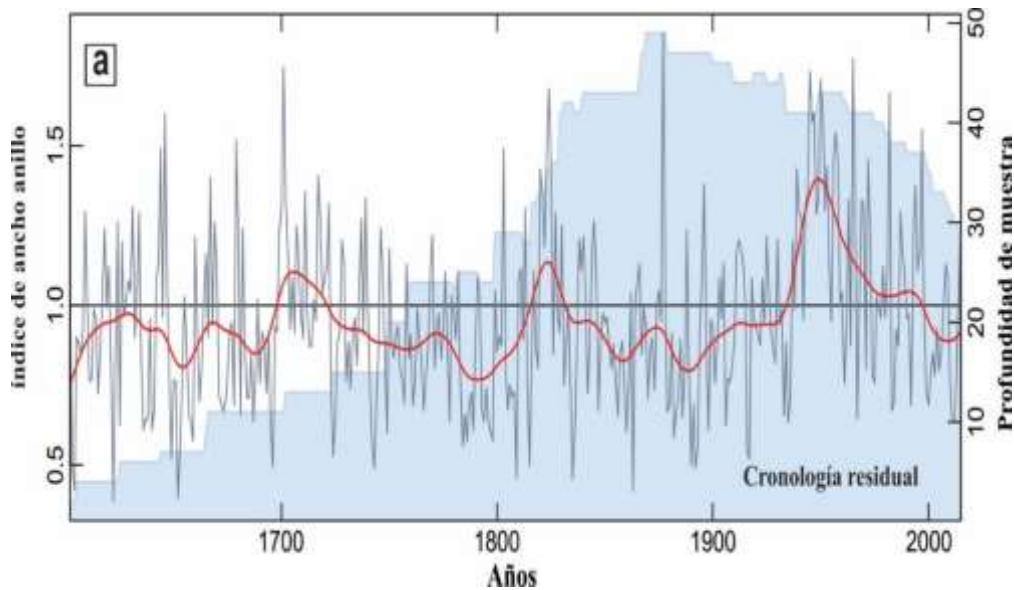


Figura 14. Cronología de ancho de anillos de *P. tarapacana* (versión residual) en líneas negras

Las estadísticas comúnmente utilizadas para establecer la calidad de la cronología indican que tiene alta variabilidad año a año ($MS = 0.29$) y una alta señal común en las variaciones interanuales de crecimiento radial entre los individuos que componen la cronología ($Rbar = 0,36$; $EPS = 0,92$; Figura 15, Tabla 2).

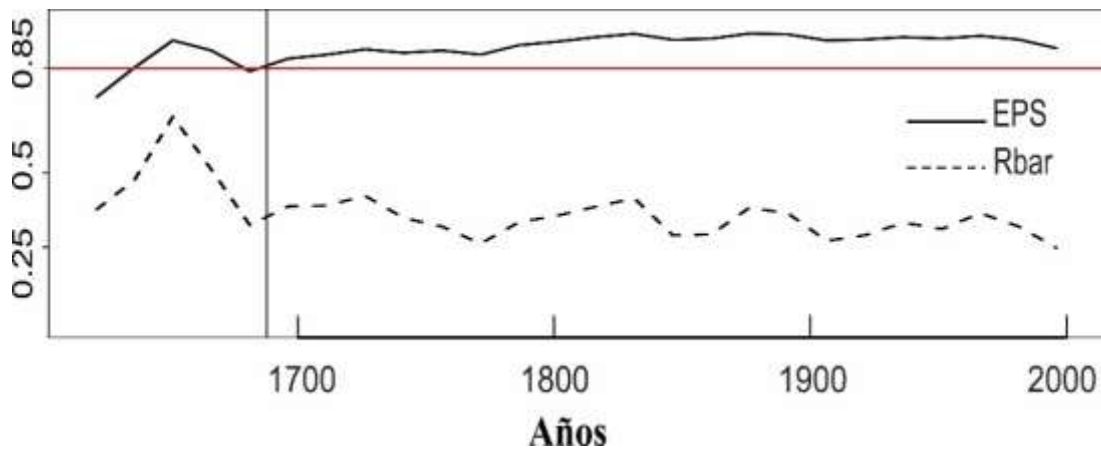


Figura 15. Estadísticas que evalúan la calidad de la cronología

El $Rbar$ muestra una alta correlación entre series, los valores positivos y significativos representan menor ruido. El EPS se muestra con el nivel de confianza (0,85). La línea vertical indica el punto en el que el EPS cae por encima de 0.85 por tanto, desde 1674 la cronología se considera más fiable.

Tabla 3. Características generales de la cronología (versión residual) de *P. tarapacana*.

Parámetros	<i>P. tarapacana</i>
N.º de series	60 radios
N.º de árboles	30 árboles
Rango	1602-2015
Periodo donde el EPS > 0.85 ^(a)	1674-2015
SM promedio ^(a)	0.29
EPS promedio ^(a)	0.92
Rbar promedio ^(a)	0.36

Nota. (a) Son valores obtenidos con el paquete dendrocronológico “dplR”

4.1.2. Relación entre clima y crecimiento radial de *P. tarapacana*

4.1.2.1. Obtención de la data climática regional

Se seleccionaron 20 estaciones meteorológicas siguiendo los criterios detallados en los métodos, sección datos climáticos. Las características de cada estación se detallan en la Tabla 3.

Con el objetivo de seleccionar estaciones que muestren la misma señal, se realizó una correlación cruzada. En la figura 16, la matriz de correlación múltiple muestra que las variables climáticas (precipitación y temperatura) de las estaciones meteorológicas seleccionadas, están correlacionadas significativa y positivamente entre ellas, durante el período 1967-2015. Estos resultados indican que existe una señal climática común entre estaciones tanto para temperatura como para precipitación.

Finalmente, para optimizar la señal común y ampliar la longitud final de las series climáticas, se generaron índices regionales de precipitación y temperatura (Z-Score) correspondiente al periodo 1967-2015 (Ver anexo).

Tabla 4. Características de las 20 estaciones meteorológicas seleccionadas para calcular el índice de precipitación y temperatura del altiplano correspondiente a Perú, Chile y Bolivia.

Estación	Código	Latitud (S)	Longitud (W)	Elevación (m)	País	Periodo	Parámetro
Pampahuta	Pam	-15.5	-70.68	4400	Perú	1962-2013	T ^a
Lampa	Lam	-15.36	-70.37	3892	Perú	1964-2013	T ^a
Puno	Pun	-15.83	-70.01	3812	Perú	1964-2012	T ^a
Ilave	Ila	-16.08	-69.64	3871	Perú	1984-2013	T ^a
Mazocruz	Maz	-16.74	-69.72	4003	Perú	1964-2014	P ^a
Desaguadero	Des	-16.56	-69.04	3808	Perú	1956-2013	T ^a
El Alto	Alt	-16.51	-68.2	4034	Bolivia	1943-2015	T ^b
Collana	Col	-16.9	-68.28	4500	Bolivia	1973-2015	P, T ^b
Capazo	Cap	-17.19	-69.74	4530	Perú	1964-2013	P ^a
Santiago de Machala	San	-17.07	-69.2	3883	Bolivia	1979-2015	P, T ^b
Calacoto	Cal	-17.28	-68.64	3830	Bolivia	1973-2015	T ^b
Visviri	Vis	-17.6	-69.5	4080	Chile	1968-2015	P ^c
Villa Industrial	Vil	-17.78	-69.71	4080	Chile	1976-2015	P
Alcerreca	Alc	-18	-69.65	3990	Chile	1971-2015	P ^c
Cotacotani	Cot	-18.18	-69.23	4550	Chile	1963-2007	P ^c
Putre	Put	-18.2	-69.56	3545	Chile	1970-2009	P ^c
Chucuyo Reten	Chu	-18.22	-69.3	4570	Chile	1962-2015	P ^c
Guallatire	Gua	-18.5	-69.15	4240	Chile	1970-2015	P ^c
Cancosa	Can	-19.85	-68.59	3930	Chile	1977-2011	P ^c
Pampa lirima	PamL	-19.94	-68.84	4076	Chile	1982-2015	P ^c

Nota. ^a Senamhi-Perú, ^b Senamhi-Bolivia y ^c Dirección meteorológica de Chile

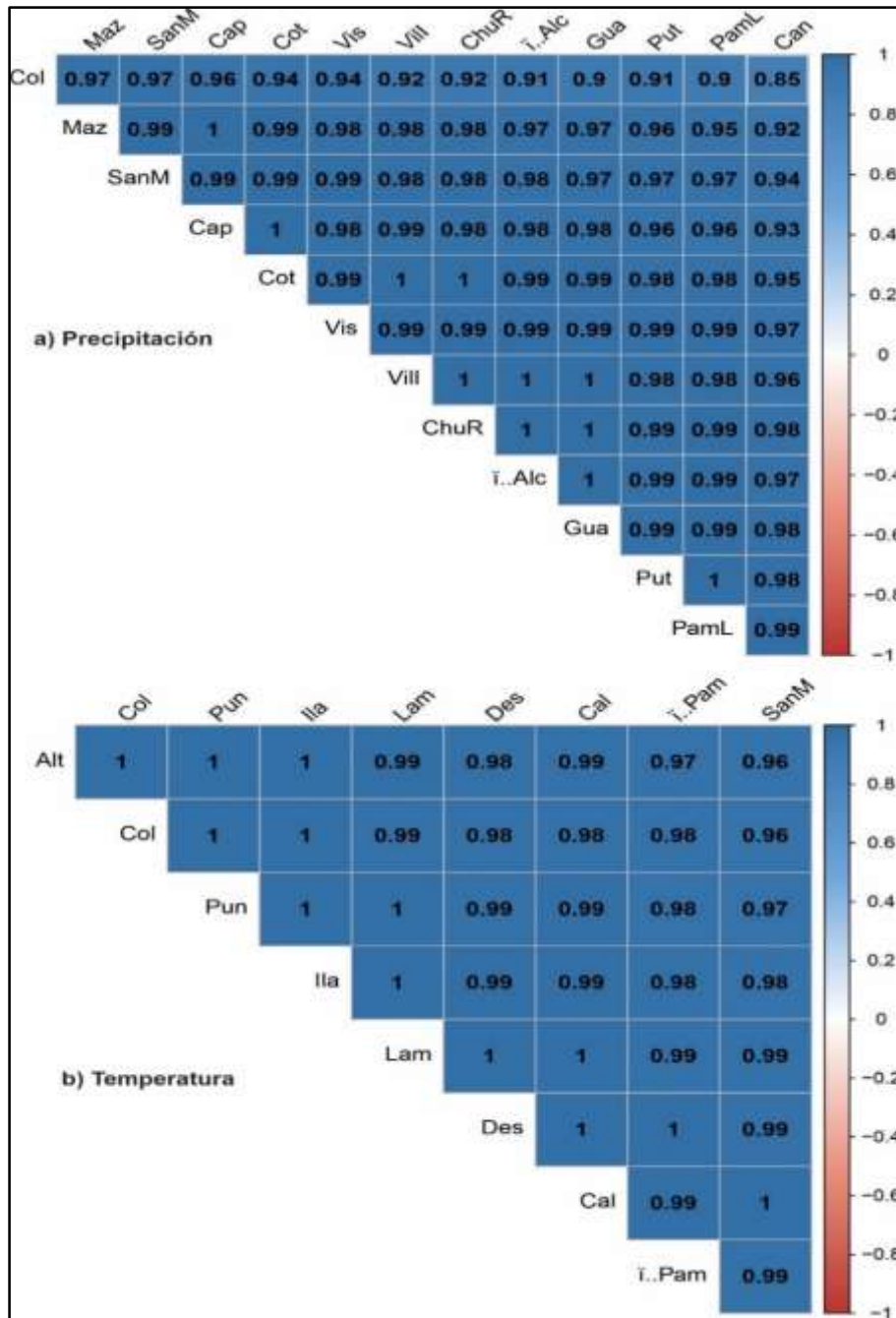


Figura 16. Matriz de correlación cruzada entre las 20 estaciones seleccionadas

4.1.2.2. Correlación mensual entre el crecimiento de *P. tarapacana* y el clima regional

Para corroborar la hipótesis 2 y 3, se realizó el análisis de correlación entre la cronología residual y los índices climáticos mensuales durante el período de 1967 a 2015 para la precipitación y temperatura regional, y de 1870-2015 para la TSM. Los coeficientes de correlación de Pearson muestran que la variabilidad climática regional y a gran escala tiene una influencia significativa contrastante

entre periodos de crecimiento consecutivo: previo (t-1) y actual (t) (figura 17). El periodo de análisis es de junio del año previo hasta mayo del año actual de formación del anillo, correspondiente al periodo 1967-2015 (precipitación y temperatura) y de 1870-2015 (TSM) Las estaciones de crecimiento (previo y actual) se indican con un sombreado rojo claro. Las líneas discontinuas representan el intervalo de confianza al 95%.

En el periodo previo de crecimiento (t-1), existe una correlación positiva significativa ($P < 0.05$) entre el crecimiento de los árboles y el índice de precipitación regional para los meses de noviembre a enero. Por el contrario, se encontraron correlaciones negativas significativas ($P < 0.05$) durante los meses de verano en el periodo actual de crecimiento (enero a marzo; figura 17a). Con respecto a la temperatura regional, se muestran correlaciones negativas durante los meses del período de crecimiento previo (figura 17b), sin embargo, existen correlaciones positivas y significativas ($P < 0.05$) durante la temporada de crecimiento actual. Los datos de TSM reflejan una correlación negativa (no significativa) en el periodo previo de crecimiento en los meses de invierno - primavera y verano (junio a marzo), pero en el periodo actual de crecimiento las correlaciones son positivas y significativas en los meses de abril hasta mayo (figura 17c).

En general, el análisis de correlación mes a mes evidencia la influencia significativa del clima regional (precipitación y temperatura) y el clima a gran escala (TSM) en el crecimiento de *P. tarapacana*, especialmente a finales de la primavera y principios del verano austral en una resolución de 3, 4 y 6 meses (precipitación, temperatura y TSM respectivamente).

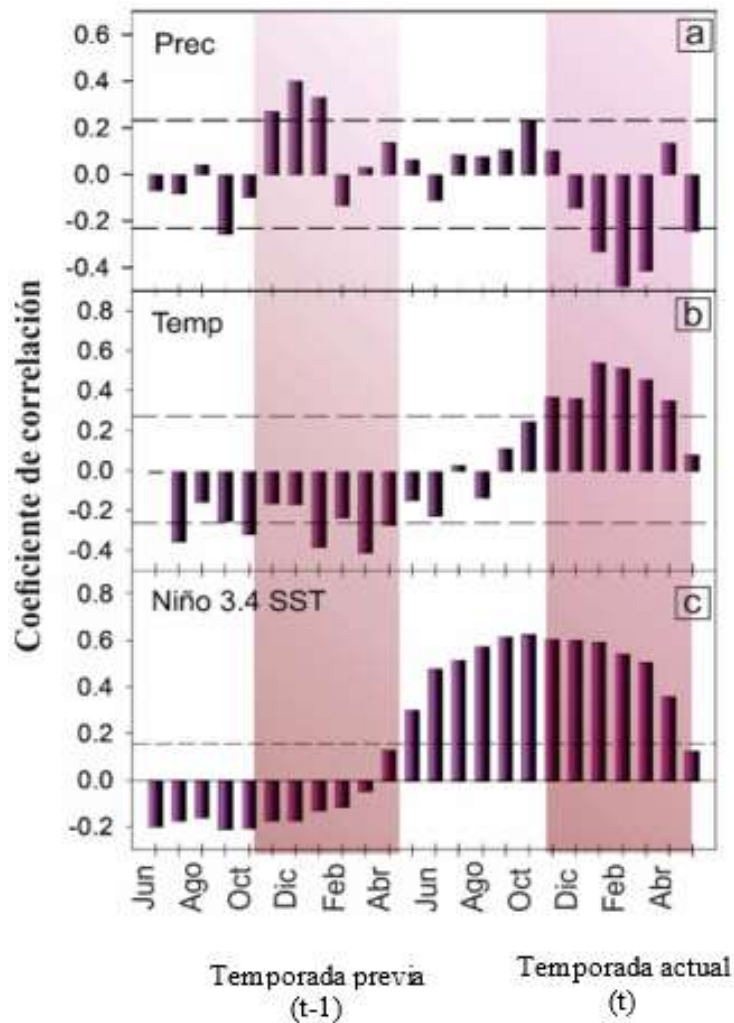


Figura 17. Coeficiente de correlación entre el crecimiento radial de *P. tarapacana* y la precipitación regional mensual (a), la temperatura regional (b) y la TSM (c)

En la figura 18a, las variaciones en el crecimiento de los árboles de *P. tarapacana* están fuertemente moduladas por la variabilidad regional de la precipitación de noviembre a enero de la temporada anterior, algunos de los anillos más anchos en la cronología se formaron después de veranos lluviosos ($r = 0.52$, $P < 0,001$). Además, la temperatura regional de noviembre a marzo en la temporada de crecimiento actual aumentó el ancho de los anillos de los árboles ($r = 0.59$, $P < 0.001$, figura 18b). De manera similar, las altas correlaciones entre el crecimiento de los árboles y la TSM de la región 3.4 de septiembre a febrero fueron positivas y significativas para el período 1856-2015 ($r = 0.57$; $P < 0.000$, figura 18c). En el análisis de años extremos, se identifica que los años húmedos (secos) coinciden con anillos anchos (estrechos), lo que sugiere que la lluvia de la temporada anterior es un factor clave para el crecimiento de los árboles (figura 18a, d). Asimismo, los años cálidos (fríos)

coinciden con anillos anchos (estrechos), esto podría indicar la influencia de temperaturas altas (bajas) que favorecen (limitan) el crecimiento (figura 18b, e). Los períodos extremadamente secos (<0,25th) fueron detectados por anillos anormalmente pequeños en 1967, 1983, 1992, 1999, 2005 y 2011 y los períodos húmedos por anillos anchos (> 0,75th) en 1969, 1972, 1979, 1987, 1992, 1999, 2005 y 2011. Esta cronología detectó algunos, pero no todos, los eventos históricos de precipitación extrema y temperatura. La figura 18c muestra una buena concordancia entre anillos extremadamente anchos y estrechos de *P. tarapacana* y la variabilidad TSM. Identificando que un total de 81 años con valores de TSM por encima (por debajo) del percentil 75 (25) para el período 1856-2015, de los cuales 22 años con anomalías TSM positivas (El Niño) coincidieron en años con anillos anchos (por ejemplo: 1877, 1888, 1899, 1905, 1930, 1957, 1965, 1972, 1982, 1994, 1997, 2015) y 19 años TSM anomalías negativas (La Niña) coincidieron en años con anillos estrechos (por ejemplo: 1873, 1892, 1916, 1917, 1942, 1975, 1998-2000 y 2010). Los años extremos de TSM en su fase positiva - El Niño (<0.75th) y negativa - La Niña (> 0.25th) contribuyeron a un crecimiento por encima / por debajo del promedio, respectivamente (figura 18f).

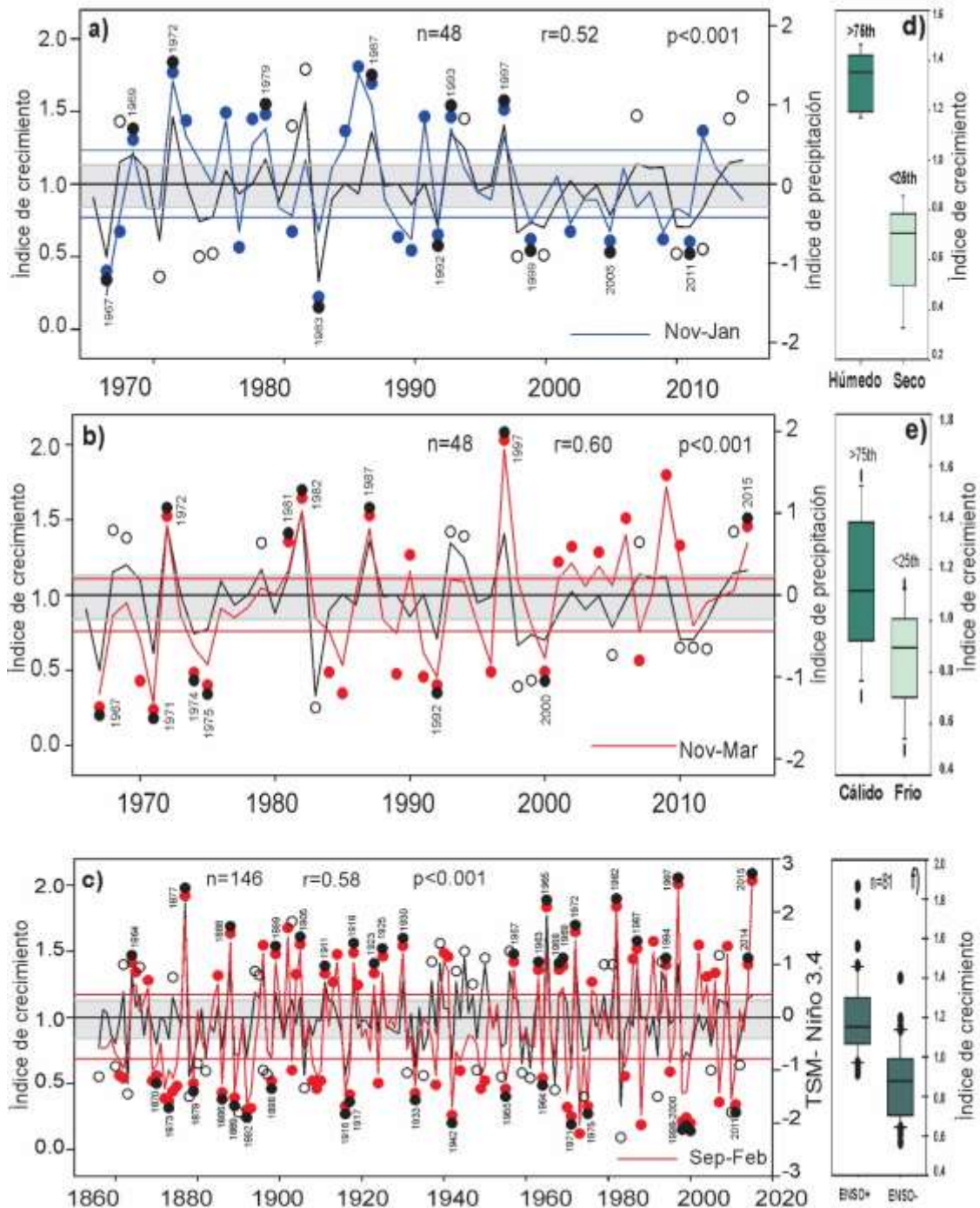


Figura 18. Variaciones temporales del índice de ancho de anillos de *P. tarapacana* con el índice de precipitación regional (noviembre a enero, año previo) (a), índice de temperatura regional (noviembre-marzo) (b) y TSM (setiembre a febrero).

4.1.3. La influencia de TSM en el crecimiento de *P. tarapacana*

La periodicidad de los eventos ENOS registrados en la cronología fue determinada por el análisis Wavelet durante el período común (1880–2015). En la figura 19, las manchas amarillas delimitadas por una línea negra indican la presencia de una relación significativa ($P < 0.05$) entre ambas variables. Los ejes de abscisas y ordenadas corresponden al eje temporal (años con datos disponibles) y al periodo en años, respectivamente. Se indica el cono de influencia (donde los efectos de borde pueden distorsionar la relación) y las áreas significativas ($p < 0.05$) se muestran mediante contornos de líneas gruesas. La relación de fases se indica mediante flechas (flechas apuntando a la derecha/izquierda indica que ambas series están en fase/desfase mostrando una relación positivo-negativa).

En la figura 19a, es notable la coherencia significativa entre TSM y el índice de crecimiento de *P. tarapacana* durante el periodo 1860 - 1930 a frecuencias de 1 a 14 años y en el período 1960 - 2000 a frecuencias de 1 a 6 y 7 a 17 años, ambas series están en fase (flechas hacia la derecha). Estos resultados indican que el crecimiento de *P. tarapacana* de 1860 - 1930 y de 1960 a 2000 ha sido influido de manera significativa por la ocurrencia de eventos ENOS.

En la figura 19b, la transformada cruzada Wavelet (XWT) muestra una gran covarianza en el dominio de baja frecuencia dentro de la banda ENOS, las señales significativas son evidentes en períodos de 2 a 10 años, no es continua ni significativa en todo el periodo de análisis. Las direcciones de los vectores en el análisis XWT revelan las relaciones de fase continua entre las dos series, entre 1870 - 1890 y posterior al 1960 - 1970 hay poder espectral común y significativo en una frecuencia de 1 a 6 años. Entre 1900 - 20 y 1940 - 60 en una frecuencia más baja entre 6 y 8 años, ambas.

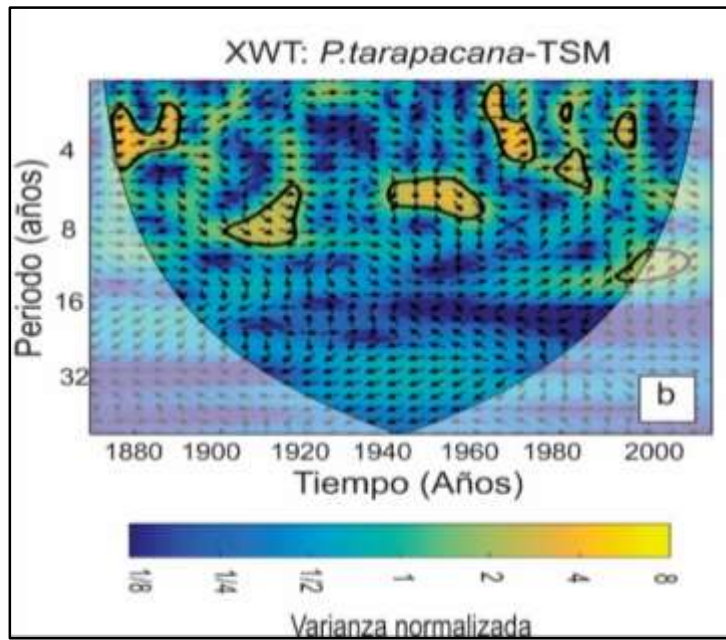
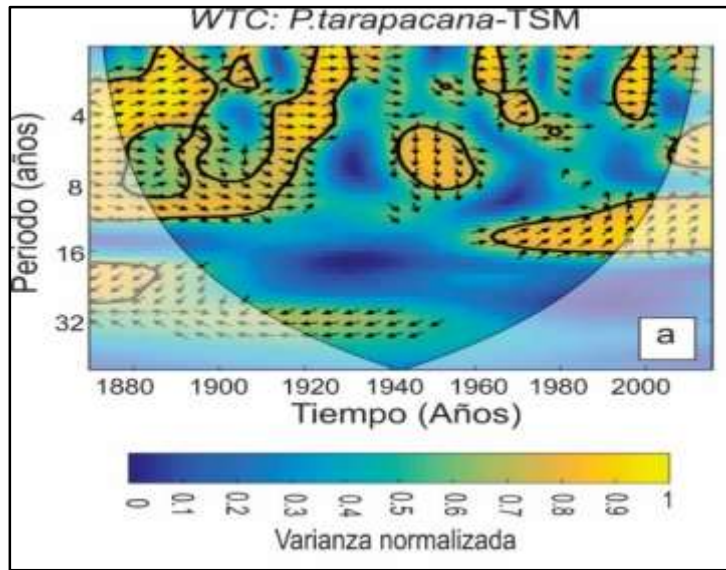


Figura 19. WTC y XWT entre el índice de ancho de anillos y TSM (septiembre - febrero)

4.1.4. Análisis espacial entre el crecimiento de *P. tarapacana* y la TSM

Los patrones de correlación espacial entre la cronología y la temperatura de la superficie del mar del océano Pacífico (TSM) de la región 3.4 (15 °N - 15 °S), correspondiente al periodo 1870 - 2015 muestran la influencia del clima a gran escala en el crecimiento de *P. tarapacana* (figura 20). El área de estudio se indica con el círculo rojo. Los campos coloreados representan coeficientes de correlación de Pearson significativos ($p < 0.1$).

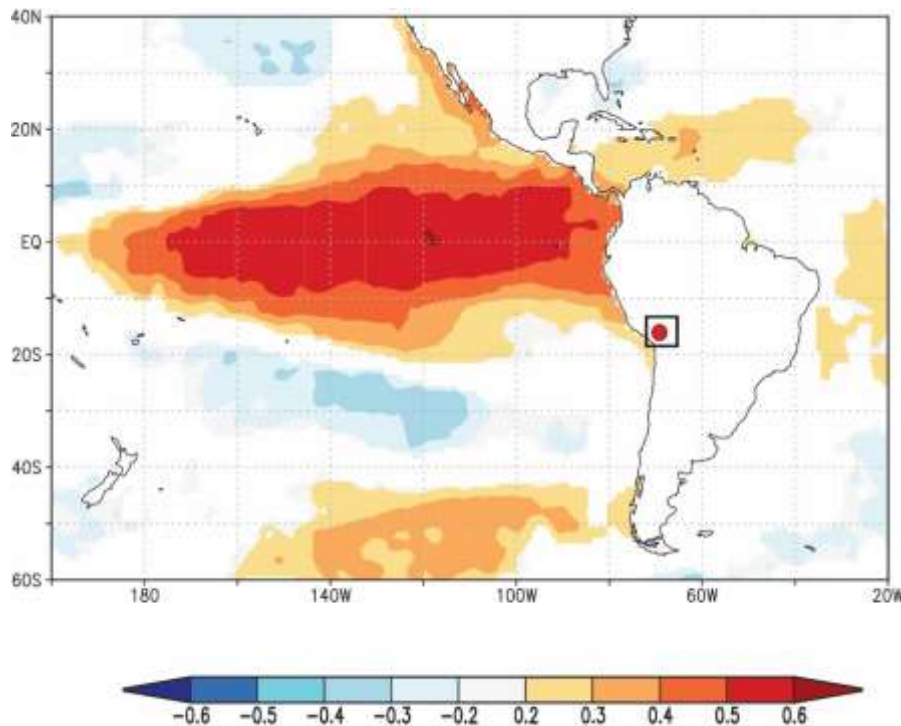


Figura 20. Campo de correlación espacial entre el crecimiento radial de *P. tarapacana* y la TSM de diciembre a marzo

En la temporada de crecimiento actual existe una influencia positiva y significativa de la TSM de la región 3.4 ($r > 0.6$). Sin embargo, a pesar de que los estadísticos son más fuertes en la temporada actual (relación positiva y significativa), la señal de baja frecuencia contenida en la cronología es positiva con respecto a la humedad del periodo previo de crecimiento (figura 20).

4.2. Discusiones de resultados

4.2.1. Cronología de anillos de árboles y series climáticas regionales

La cronología obtenida es la segunda desarrollada en el altiplano peruano, la primera fue reportada de un bosque de *P. tarapacana* en localidad de Paucarani, ubicado a 14 km del bosque de Chiluyo (21), sin embargo, el periodo que abarca es de 228 años (1787 - 2015). La cronología reportada en este estudio es más longeva, abarca el periodo desde 1602 - 2015 (414 años).

Los estadísticos de mayor importancia SM (0.29), Rbar (0.36) indican que esta cronología es aceptable y comparable con otras cronologías de la región del Altiplano. Los valores de la SM coinciden a los hallados por Christie (15) con valor de SM=0.28 para Chile (Guallatire), SM=0.27 (Huarikunka) en Bolivia (20) y Argentina con un valor de SM=0.31 (Cerro Granda) (16).

El EPS que expresa la calidad de una cronología fue aceptable a partir de 1674-2015 (EPS>0.85), umbral marcado por (70), indicando que la cantidad de árboles utilizados es lo suficientemente grande para representar la población de árboles del bosque de Chiluyo (78).

4.2.2. Relación entre clima y crecimiento radial

Muchos estudios dendrocronológicos han reportado que las condiciones climáticas de la estación de crecimiento de un “año t” influye o controlan el crecimiento cambial durante el siguiente ciclo vegetativo “año t+1” (26). Los estudios dendrocronológicos realizados en el altiplano de Bolivia, Chile y Argentina encontraron respuestas contrastantes en periodos consecutivos de crecimiento. Los resultados indican que la variabilidad climática durante el verano previo regula fuertemente el crecimiento radial de *P. tarapacana* (19; 23).

En el verano previo, la precipitación muestra relaciones positivas significativas con el índice de crecimiento de *P. tarapacana*. En Bolivia, las funciones de correlación indican que el crecimiento de *P. tarapacana* está controlado por la disponibilidad hídrica durante los meses del verano previo (19). En Chile, la precipitación de diciembre y enero presentó correlaciones positivas significativas con el crecimiento de *P. tarapacana* (88). En Argentina, la

precipitación de enero a marzo del verano previo tiene correlaciones positivas y significativas (20). En general, estos resultados similares señalan que el crecimiento de *P. tarapacana* está controlado por la precipitación del verano previo especialmente en el mes de diciembre y enero. En contraste, en esta temporada de crecimiento la temperatura regional y la TSM exhiben correlaciones negativas. La influencia contrastante de precipitación y temperatura en el crecimiento de *P. tarapacana* en esta misma temporada de crecimiento, podría deberse al efecto negativo de altas temperaturas sobre la disponibilidad hídrica; lo cual aumenta el proceso de evapotranspiración en las plantas y la evaporación directa del suelo, causando una disminución en la disponibilidad de agua, provocando estrés fisiológico en el crecimiento de los árboles (19; 15; 23; 81).

Por el contrario, en el verano actual existe una relación positiva y significativa entre la temperatura y el crecimiento de *P. tarapacana*, observándose que los meses más cálidos (noviembre a abril) favorecen el crecimiento. Estos resultados muestran similitud con trabajos anteriores desarrollados en Bolivia, Chile y Argentina; donde presentan correlaciones similares (19; 15; 23; 81).

En general, se tiene de conocimiento que, los árboles que crecen a gran altitud tienden a estar limitados por la temperatura fría (31), este es el caso de *P. tarapacana*. La temperatura muestra correlaciones positivas y significativas con el índice de crecimiento; temperaturas relativamente cálidas favorecen y temperaturas frías restringen el crecimiento. Otros estudios desarrollados en el altiplano señalan que la temperatura es el factor limitante más importante (19; 87; 20).

Sin embargo, las condiciones climáticamente favorables en el verano previo son las que influyen en el crecimiento de *P. tarapacana* (19; 20; 25). Aunque estos resultados muestran que *P. tarapacana* es sensible a la temperatura fría en el año en que se forma el anillo (t), es muy probable que la disponibilidad de humedad en años anteriores es clave para su crecimiento (25).

Dadas las condiciones climáticas extremas del altiplano y el crecimiento a grandes altitudes, los estudios dendroclimatológicos de *P. tarapacana* requieren ser complementados con estudios ecofisiológicos (87).

4.2.3. Influencia de ENOS en el crecimiento de *P. tarapacana*

ENOS, inferido a partir de la temperatura de la superficie del mar de la región 3.4, tiene una influencia significativa en la variabilidad climática de baja frecuencia (interanuales e interdecadales) en el altiplano (88), por tanto, repercute significativamente en el crecimiento de *P. tarapacana*. El análisis Wavelet, muestra las oscilaciones espectrales dominantes entre el crecimiento de *P. tarapacana* y la TSM correspondiente a los meses de setiembre a febrero dentro del ancho de banda ENOS clásico (interanual a decadal). Sin embargo, no es continua en todo el periodo de análisis. Esas consistencias no homogéneas para los ciclos interanuales podrían estar relacionadas con el comportamiento no estacionario de ENOS (15).

La correlación espacial entre el índice de ancho del anillo y las anomalías de la temperatura superficial del mar - TSM en el año actual de formación del anillo muestra la influencia de la circulación atmosférica modulada por el océano Pacífico tropical de la región 3.4 en el crecimiento radial de *P. tarapacana*.

P. tarapacana es extremadamente sensible a los eventos de ENOS (15). Esta cronología de *P. tarapacana* representa una fuente indirecta (proxy climático) de alta resolución, extremadamente sensible a la variabilidad climática regional y a gran escala. Esta cronología del altiplano peruano es de gran relevancia científica, ofrece una oportunidad única para realizar reconstrucciones temporales que exceden los registros instrumentales de esta región, a futuro permitirá ampliar el conocimiento de diversas variables climáticas como ENOS y el monzón de América del Sur (SASM) (19; 82; 81).

CONCLUSIONES

1. El crecimiento radial de *P. tarapacana* del bosque de Chiluyo, Tacna en el altiplano sur de Perú estuvo fuertemente regulado por la variabilidad climática regional (precipitación y temperatura) y a la variabilidad climática a gran escala (TSM).
2. La precipitación de término de primavera y verano determinan el crecimiento radial de *P. tarapacana*, las abundantes lluvias son favorables y menos lluvia suprime su crecimiento.
3. La temperatura es el factor climático limitante más importante en el crecimiento radial de *P. tarapacana*. Temperaturas relativamente cálidas favorecen y temperaturas frías limitan el crecimiento en la temporada actual de formación del anillo.
4. La variabilidad climática a gran escala tiene un fuerte impacto en el crecimiento radial de *P. tarapacana* en el altiplano sur de Perú. La ocurrencia del fenómeno El Niño oscilación del sur- ENOS en su fase cálida (El Niño) y en su fase fría (La Niña) inferidas a partir de la temperatura de la superficie del mar, favorecen y restringen el crecimiento de *P. tarapacana*, respectivamente.

RECOMENDACIONES

1. Ante las correlaciones significativas encontradas entre el ancho de los anillos de crecimiento de *P. tarapacana* con la precipitación, temperatura y la temperatura de la superficie del mar - TSM; es recomendable desarrollar más series dendrocronológicas en el Altiplano peruano, para realizar reconstrucciones de la variabilidad climática regional y del fenómeno de El Niño oscilación del sur de las últimas centurias y así ampliar el conocimiento del clima hasta antes de la existencia de registros instrumentales.
2. El Perú tiene la mayor cantidad de especies de *Polylepis* a través de la cordillera de los Andes, se sugiere realizar estudios de potencialidad dendrocronológica de las especies que aún no han sido reportadas.
3. Antiguamente, se usaban los *Polylepis* como madera de construcción en el techado, puertas, etc., se recomienda buscar construcciones antiguas como iglesias, casonas u otras en la localidad de Chiluyo. Esta búsqueda permitirá incrementar la cantidad de muestras y ampliar la cronología en el tiempo para realizar reconstrucciones más extensas.

REFERENCIAS

1. **GARREAUD, René.** Multiscale analysis of the summertime precipitation over the central Andes. *Monthly Weather Review*, 1999, vol. 127, n.º 5, p. 901-921.
2. **GARREAUD, René; ACEITUNO, Patricio.** Interannual rainfall variability over the South American Altiplano. *Journal of climate*, 2001, vol. 14, n.º 12, p. 2779-2789.
3. **GARREAUD, René; VUILLE, Mathias; CLEMENT, Amy C.** *The climate of the Altiplano: observed current conditions and mechanisms of past changes.* Palaeogeography, palaeoclimatology, palaeoecology, 2003, vol. 194, no 1-3, p. 5-22.
4. **GARREAUD, René; WALLACE, John M.** The diurnal march of convective cloudiness over the Americas. *Monthly Weather Review*, 1997, vol. 125, n.º 12, p. 3157-3171.
5. **GARREAUD, René D.; SELUCHI, Marcelo.** *Pronóstico de la convección en el Altiplano Sudamericano: Empleo del modelo regional ETA/CPTEC.* *Meteorológica*, 2001, vol. 26, n.º 1, p. 25-38.
6. **VUILLE, Mathias et al.** Impact of the global warming hiatus on Andean temperature. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2015, vol. 120, no 9, p. 3745-3757.
7. **VARGAS, Paola et al.** *El cambio climático y sus efectos en el Perú.* Lima: Banco Central de Reserva del Perú, 2009.
8. **ANDRADE, Marcos; LAVADO-CASIMIRO, W.; BRÖNNIMANN, Stefan.** *Clima y eventos extremos del Altiplano Central Perú-Boliviano.* 2018.
9. **GARREAUD, René D. et al.** *Present-day south American climate.* Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2009, vol. 281, no 3-4, p. 180-195.
10. **ACEITUNO, P.** *Aspectos generales del clima en el altiplano.* *El altiplano, ciencia y conciencia en los Andes.* Ed. Depto. Postgrado y postítulo, Vicerrectoría Académica y Estudiantil, Universidad de Chile, 1997.
11. **KESSLER, Michael.** *Present and potential distribution of Polylepis (Rosaceae) forests in Bolivia.* *Biodiversity and conservation of neotropical montane forests*, 1995, p. 281-294.

12. **MENDOZA, Wilfredo; CANO, Asunción.** Diversidad del género *Polylepis* (Rosaceae, Sanguisorbeae) en los Andes peruanos. *Revista peruana de Biología*, 2011, vol. 18, n.º 2, p. 197-200.
13. **DOMIC, Alejandra I.; CAPRILES, José M.** *Allometry and effects of extreme elevation on growth velocity of the Andean tree Polylepis tarapacana Philippi (Rosaceae).* *Plant ecology*, 2009, vol. 205, no 2, p. 223-234.
14. **BRAUN, Gerald.** *The use of digital methods in assessing forest patterns in an Andean environment: the Polylepis example.* Mountain Research and Development, 1997, p. 253-262.
15. **CHRISTIE, Duncan A. et al.** *El Niño-Southern Oscillation signal in the world's highest-elevation tree-ring chronologies from the Altiplano, Central Andes.* *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2009, vol. 281, n.º 3-4, p. 309-319.
16. **MORALES, Mariano S. et al.** *Rainfall-controlled tree growth in high-elevation subtropical treelines.* *Ecology*, 2004, vol. 85, n.º 11, p. 3080-3089.
17. **PARRY, Martin et al.** *Cambio climático 2007-impactos, adaptación y vulnerabilidad: contribución del Grupo de trabajo II al cuarto informe de evaluación del IPCC.* Prensa de la Universidad de Cambridge, 2007.
18. **VUILLE, Michael.** Atmospheric circulation over the Bolivian Altiplano during dry and wet periods and extreme phases of the Southern Oscillation. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 1999, vol. 19, n.º 14, p. 1.
19. **ARGOLLO, Jaime; SOLIZ, Claudia; VILLALBA, Ricardo.** *Potencialidad dendrocronológica de Polylepis tarapacana en los Andes Centrales de Bolivia.* *ecología en Bolivia*, 2004, vol. 39, n.º 1, p. 5-24.
20. **SOLIZ, Claudia et al.** *Spatio-temporal variations in Polylepis tarapacana radial growth across the Bolivian Altiplano during the 20th century.* *palaeogeography, palaeoclimatology, palaeoecology*, 2009, vol. 281, no 3-4, p. 296-308.
21. **REQUENA-ROJAS, Edilson J. et al.** Temporal Growth Variation in High-Elevation Forests: Case Study of *Polylepis* Forests in Central Andes. *En Latin American Dendroecology.* Springer, Cham, 2020. p. 263-279.
22. **ACEITUNO, Patricio.** Elementos del clima en el Altiplano Sudamericano. *Revista Geofísica-IPGH*, 1996, vol. 44, p. 37 citation_lastpage= 55.

23. **MORALES, Mariano Santos et al.** *Variabilidad hidroclimática en el sur del Altiplano: pasado, presente y futuro.* 2018.
24. **DOMIC, Alejandra.** *Influencia de los factores climáticos en el crecimiento radial de la keñua.*
25. **RÍOS, R.** *Estudios de la distribución y caracterización ecológica de las poblaciones locales de queñoa de altura (Polylepis tarapacana Phil.) en el sector de la provincia de Iquique, Tarapacá.* Santiago, Chile. 1998.
26. **MORALES, Mariano S. et al.** *Precipitation changes in the South American Altiplano since 1300 AD reconstructed by tree-rings.* 2012.
27. **SILVA, V.** *Estudio dendrocronológico de una población de Polylepis rugulosa en los Andes.*
28. **GUNDERSON, Jeffrey.** *Assessing the Dendroclimatological Potential of Polylepis rodolfovasquezii in the Tropical Peruvian Andes.* 2019. Tesis . The Ohio State.
29. **MERINO GUTIÉRREZ, Emilia.** La dendrocronología: métodos y aplicaciones. *En Arqueologia nàutica mediterrània.* 2009. p. 309-322.
30. **KAENNEL, Michele; SCHWEINGRUBER, Fritts H.** *Multilingual glossary of dendrochronology.* WSL FNP, Haupt, 1995, vol. 133, p. 162-184.
31. **SPEER, James H.** *Fundamentals of tree-ring research.* Indiana State University, lk, 2009, p. 41-45.
32. **COOK, E. et al.** *Data analysis. Methods of dendrochronology.* Springer, Dordrecht, 1990. p. 97-162.
33. **JONES, P. D. et al.** *High-resolution palaeoclimatic records for the last millennium: interpretation, integration and comparison with General Circulation Model control-run temperatures.* The Holocene, 1998, vol. 8, no 4, p. 455-471.
34. **FRITTS, Harold.** *Tree rings and climate.* Elsevier, 2012.
35. **STOKES, M. A.; SMILEY, T. L.** *Introduction to tree-ring dating.* University of Chicago. 1968.
36. **LARSON, P. R.** *Fossil Evidence. In the Vascular Cambium* (pp. 7-8). Springer, Berlin, Heidelberg. 1994.
37. **GRISSINO-MAYER, Henri D.** *Evaluating crossdating accuracy: a manual and tutorial for the computer program COFECHA.* 2001.

38. **COOK, Edward R. et al.** *Tree-ring standardization and growth-trend estimation. Methods of dendrochronology: applications in the environmental sciences*, 1990, p. 104-123.
39. **COOK, E. R.; KRUSIC, P. J.** *Program ARSTAN: a tree-ring standardization program based on detrending and autoregressive time series modeling, with interactive graphics*. Lamont-Doherty Earth Observatory, Columbia University, Palisades, NY, 2005.
40. **SCHWEINGRUBER, Fritz Hans.** *Tree rings: basics and applications of dendrochronology*. Springer Science & Business Media, 2012.
41. **FJELDSÅ, Jon et al.** *Conserving the biological diversity of *Polylepis* woodlands of the highland of Peru and Bolivia: a contribution to sustainable natural resource management in the Andes*. Copenhagen: Nordeco, 1996.
42. **JØRGENSEN, Peter M. et al.** *Regional patterns of vascular plant diversity and endemism. Climate Change and Biodiversity in the Tropical Andes*. Inter-American Institute for Global Change Research (IAI) and Scientific Committee on Problems of the Environment.
43. **REQUENA-ROJAS, E. J.; MORALES, M.; VILLALBA, R.** Dendroclimatological assessment of *Polylepis rodolfo-vasquezii*: a novel *Polylepis* species in the Peru highlands. *Dendrochronologia*, 2020, p. 125722.
44. **CASTRO, Andrés; FLORES, Mercedes.** Caracterización de un bosque de queñual (*Polylepis* spp.) ubicado en el Distrito de Huasta, Provincia de Bolognesi (Ancash, Perú). *Ecología aplicada*, 2015, vol. 14, no 1, p. 1-9.
45. **BOZA ESPINOZA, Tatiana Erika; QUISPE-MELGAR, Harold R.; KESSLER, Michael.** Taxonomic reevaluation of the *Polylepis sericea* complex (Rosaceae), with the description of a new species. *Systematic Botany*, 2019, vol. 44, n.º 2, p. 324-334.
46. **SEGOVIA-SALCEDO, María C. et al.** Situación taxonómica de las especies del género *Polylepis*. Implicancias para los estudios ecológicos, la conservación y la restauración de sus bosques. *Ecología austral*, 2018, vol. 28, n.º 1-bis, p. 188-201.
47. **WORLD Conservation Monitoring Centre.** *Polylepis tarapacana*. The IUCN Red List of Threatened Species 1998: e.T32050A9677438. <https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.1998.RLTS.T32050A9677438>.

48. **EL PERUANO, Diario Oficial.** *Aprueban Categorización de Especies Amenazadas de Flora Silvestre.* Decreto Supremo N 043-2006-AG.
49. **TOIVONEN, Johanna M. et al.** *Interspecific variation in functional traits in relation to species climatic niche optima in Andean *Polylepis* (Rosaceae) tree species: evidence for climatic adaptations.* *Functional Plant Biology*, 2014, vol. 41, n.º 3, p. 301-31.
50. **GONZÁLEZ, J. A. et al.** *Altitudinal and seasonal variation of protective and photosynthetic pigments in leaves of the world's highest elevation trees *Polylepis tarapacana* (Rosaceae).* *Acta Oecologica*, 2007, vol. 32, n.º 1, p. 36-41.
51. **KUMAR, M.** *Proyecto Conservación y forestación de queñoa (*Polylepis* spp.). Collahuasi.* Informe de avances del proyecto. Período 1 de julio de 1999 : s. n. 2000.
52. **MORALES ARANIBAR, Luis Fortunato.** *Estado actual del bosque de *Polylepis* y su eficiencia en la captura de CO2 en la provincia de Tarata, departamento de Tacna.* 2014.
53. **REQUENA-ROJAS, E. J. y Arroyo, A. T.** *Anatomía del leño y caracterización de los anillos de crecimiento en individuos de *Polylepis tarapacana* en el Altiplano-Tacna-Perú.*
54. **ALVITES, C. et al.** *Dendrochronological analysis and growth patterns of *Polylepis reticulata* (Rosaceae) in the Ecuadorian Andes.* *IAWA journal*, 2019, vol. 40, no 2, p. 331-S5.
55. **JOMELLI, Vincent et al.** *Analysis of the dendroclimatic potential of *Polylepis pepeii*, *P. subsericans* and *P. rugulosa* in the tropical Andes (Peru-Bolivia).* *Tree-Ring Research*, 2012, vol. 68, n.º 2, p. 91-103.
56. **ROIG, Fidel et al.** *Estudios dendrocronológicos en los ambientes húmedos de la puna boliviana.* *Revista Boliviana de Ecología y Conservación Ambiental*, 2013, n.º 9.
57. **LANZA, Maricel G.; MARCORA, Paula Inés; CHARTIER, Marcelo Pablo.** *Relación clima-crecimiento radial de *Polylepis australis* en un gradiente altitudinal en las Sierras Grandes de Córdoba, Argentina.* 2018.
58. **SUAREZ, Ma Laura et al.** *Age–size–habitat relationships for *Polylepis australis*: dealing with endangered forest ecosystems.* *Biodiversity and conservation*, 2008, vol. 17, no 11, p. 2617-2625.

59. **ACEITUNO, Patricio; MONTECINOS, Aldo.** *Análisis de la estabilidad de la relación entre la Oscilación del Sur y la precipitación en América del Sur.* Bull. Inst. Fr. Étud. Andines, 1993, vol. 22, n.º 1, p. 53-64.
60. **ROMERO, Hugo et al.** Macro y mesoclimas del altiplano andino y desierto de Atacama: desafíos y estrategias de adaptación social ante su variabilidad. *Revista de Geografía Norte Grande*, 2013, n.º 55, p. 19-41.
61. **MENDES, Marcus Vinícius.** *O sistema de monções da América do Sul.* *Revista Marítima Brasileira*, 2020, vol. 140, n.º 04/06, p. 125-125.
62. **MENDONÇA, Magaly.** *Monzón sudamericano: la integración de la circulación amazónica y altiplánica y las variabilidades climáticas del altiplano andino chileno.* *Diálogo andino*, 2017, n.º 54, p. 21-30.
63. **GAN, Manoel Alonso; RODRIGUES, Luiz R.; RAO, Vadlamudi B.** *Monção na américa do sul.* Chapter, 2009, vol. 19, p. 297-312.
64. **HANLEY, Deborah E. et al.** *A quantitative evaluation of ENSO indices.* *Journal of Climate*, 2003, vol. 16, n.º 8, p. 1249-1258.
65. **LENTERS, J. D.; COOK, K. H.** Summertime precipitation variability over South America: Role of the large-scale circulation. *Monthly Weather Review*, 1999, vol. 127, n.º 3, p. 409-431.
66. **VUILLE, Mathias; BRADLEY, Raymond S.; KEIMIG, Frank.** Interannual climate variability in the Central Andes and its relation to tropical Pacific and Atlantic forcing. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2000, vol. 105, n.º D10, p. 12447-12460.
67. **BRIFFA, Keith R.** Interpreting high-resolution proxy climate data—the example of dendroclimatology. *En Analysis of climate variability.* Springer, Berlin, Heidelberg, 1999. p. 77-94.
68. **RODRÍGUEZ JIMÉNEZ, Andrés; PÉREZ JACINTO, Alipio Omar.** Métodos científicos de indagación y de construcción del conocimiento. *Revista Ean*, 2017, n.º 82, p. 179-200.
69. **BUNGE, Mario.** *La investigación científica: su estrategia y su filosofía. Siglo XXI*, 2002.
70. **HERNÁNDEZ SAMPIERI, R; FERNÁNDEZ COLLADO, BAPTISTA LUCIO, P.** *Metodología de la investigación.* Quinta edición, México DF, México, McGraw-Hill, 2014.

71. **ARIAS, Fidas G.** *El Proyecto de Investigación. Introducción a la metodología científica*. 5ta. Edición. Editorial Episteme. Caracas, Venezuela, 2012.
72. **MORALES ARANIBAR, Luis Fortunato.** *Distribución, diversidad y plan de conservación de los bosques de Polylepis en la región de Tacna*. 2017.
73. **CARILLA, Julieta et al.** *Vegetación de la Puna argentina. La Puna Argentina. Naturaleza y Cultura*. Tucumán, Argentina: Fundación Miguel Lillo, 2018.
74. **YAMAGUCHI, David K.** *A simple method for cross-dating increment cores from living trees*. Canadian Journal of Forest Research, 1991, vol. 21, n.º 3, p. 414-416.
75. **SCHULMAN, Edmund.** *Dendroclimatic changes in semiarid America*. University of Arizona Press. 1956.
76. **HOLMES, R. L.** *Program COFECHA user's manual*. Laboratory of Tree-Ring Research, The University of Arizona, Tucson, 1983.
<http://mariabaias.com/dendrochronology-tree-ring-dating/>.
77. **BUNN, Andrew G.** *Statistical and visual crossdating in R using the dplR library*. Dendrochronologia, 2010, vol. 28, n.º 4, p. 251-258.
78. **WIGLEY, Thomas ML; BRIFFA, Keith R.; JONES, Phillip D.** On the average value of correlated time series, with applications in dendroclimatology and hydrometeorology. *Journal of climate and Applied Meteorology*, 1984, vol. 23, n.º 2, p. 201-213.
79. **GILMAN, Donald L.; FUGLISTER, Fred J.; MITCHELL JR, J. Murray.** *On the power spectrum of "red noise"*. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1963, vol. 20, n.º 2, p. 182-184.
80. **BLASING, T. J.; SOLOMON, A. M.; DUVICK, D. N.** *Response functions revisited*. 1984.
81. **TORRENCE, Christopher; COMPO, Gilbert P.** *A practical guide to wavelet analysis*. *Bulletin of the American Meteorological society*, 1998, vol. 79, n.º 1, p. 61-78.
82. **PERCIVAL, Donald B.; WALDEN, Andrew T.** *Wavelet methods for time series analysis*. Cambridge university press, 2000.
83. **GRINSTED, Aslak; MOORE, John C.; JEVREJEVA, Svetlana.** *Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series*. 2004.

84. **JEVREJEVA, S.; MOORE, J. C.; GRINSTED, A.** Influence of the Arctic Oscillation and El Niño-Southern Oscillation (ENSO) on ice conditions in the Baltic Sea: The wavelet approach. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2003, vol. 108, n.° D21.
85. **SPEER, James H.** *Fundamentals of tree-ring research*. University of Arizona Press, 2010.
86. **RADA, Fermín et al.** *Low-temperature resistance in *Polylepis tarapacana*, a tree growing at the highest altitudes in the world*. *Plant, Cell & Environment*, 2001, vol. 24, n.° 3, p. 377-381.
87. **GARCÍA-PLAZAOLA, José I. et al.** *Photosynthetic responses of trees in high-elevation forests: comparing evergreen species along an elevation gradient in the Central Andes*. *AoB Plants*, 2015, vol. 7.
88. **MOYA, Jorge; LARA, Antonio.** *Cronologías de ancho de anillos de queñoa (*Polylepis tarapacana*) para los últimos 500 años en el Altiplano de la región de Arica y Parinacota, Chile*. *Bosque (Valdivia)*, 2011, vol. 32, n.° 2, p. 165-173.
89. **MORALES, Mariano Santos et al.** *Multi-century lake area changes in the Southern Altiplano: a tree-ring-based reconstruction*. 2015.
90. **ACEITUNO, Patricio.** On the functioning of the Southern Oscillation in the South American sector. Part I: Surface climate. *Monthly Weather Review*, 1988, vol. 116, n.° 3, p. 505-524.
91. **CARILLA, Julieta et al.** *Lake fluctuations, plant productivity, and long-term variability in high-elevation tropical Andean ecosystems*. *Arctic, antarctic, and alpine research*, 2013, vol. 45, no 2, p. 179-189.
92. **CARRER, Marco; URBINATI, Carlo.** *Long-term change in the sensitivity of tree-ring growth to climate forcing in *Larix decidua**. *New Phytologist*, 2006, vol. 170, no 4, p. 861-872.
93. **FERRERO, María Eugenia et al.** *Tree-growth responses across environmental gradients in subtropical Argentinean forests*. *Plant ecology*, 2013, vol. 214, n.° 11, p. 1321-1334.
94. **GAN, M. A.; KOUSKY, V. E.; ROPELEWSKI, C. F.** The South America monsoon circulation and its relationship to rainfall over west-central Brazil. *Journal of climate*, 2004, vol. 17, n.° 1, p. 47-66.

95. **HARDY, Douglas R. et al.** *Annual and daily meteorological cycles at high altitude on a tropical mountain. Bulletin of the American Meteorological Society*, 1998, vol. 79, n.º 9, p. 1899-1914.
96. **HUANG, Boyin et al.** Extended reconstructed sea surface temperature, version 5 (ERSSTv5): upgrades, validations, and intercomparisons. *Journal of Climate*, 2017, vol. 30, no 20, p. 8179-8205.
97. **LAGOS, P. et al.** *El Niño related precipitation variability in Perú*. 2008.
98. **LÓPEZ, Lidio; VILLALBA, Ricardo.** *Climate influences on the radial growth of Centrolobium microchaete, a valuable timber species from the tropical dry forests in Bolivia*. *Biotropica*, 2011, vol. 43, no 1, p. 41-49.
99. **MONTERO, Raquel Gil; VILLALBA, Ricardo.** *Tree rings as a surrogate for economic stress—an example from the Puna of Jujuy, Argentina in the 19th century*. *Dendrochronologia*, 2005, vol. 22, no 3, p. 141-147.
100. **RONCHAIL, Josyane; GALLAIRE, Robert.** ENSO and rainfall along the Zongo valley (Bolivia) from the Altiplano to the Amazon basin. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 2006, vol. 26, no 9, p. 1223-1236.
101. **SCHULZ, N.; BOISIER, J. P.; ACEITUNO, P.** Climate change along the arid coast of northern Chile. *International Journal of Climatology*. 2012. págs. 1803-1814. Vol. 32.
102. **VUILLE, Mathias; BAUMGARTNER, Michael F.** Hydrologic investigations in the north Chilean Altiplano using landsat-MSS and-TM data. *Geocarto International*, 1993, vol. 8, n.º 3, p. 35-45.
103. **WIGLEY, T. M., BRIFFA, K. R. and JONES, P. D.** On the average value of correlated time series, with applications in dendroclimatology and hydrometeorology. *Journal of climate and Applied Meteorology* 23(2): 201-213. (1984)
104. **YAMAGUCHI, D. K.** A simple method for cross-dating increment cores from living trees. *Canadian Journal of forest research* 21(3): 414-416.1991.
105. **ZANG, Christian; BIONDI, Franco.** Treeclim: An R package for the numerical calibration of proxy-climate relationships. *Ecography*, 2015, vol. 38, no 4, p. 431-436.
106. **TRENBERTH, Kevin E.** *The definition of el nino. Bulletin of the American Meteorological Society*, 1997, vol. 78, n.º 12, p. 2771-2778.

107. **PACHAURI, Rajendra K. et al.** *Climate change 2014: synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Ipcc, 2014.
108. **GÉNOVA, M.** *Extreme pointer years in tree-ring records of Central Spain as evidence of volcanic eruptions (Huaynaputina, Peru, 1600AC) and other climatic events.* *Climate of the Past Discussions*, 2011, vol. 7, n.º 6.
109. **RAYNER, N. A.; PARKER, D. E.; HORTON, E. B.; FOLLAND, C. K.; ALEXANDER, L. V.; ROWELL, D. P.; KENT, E. C.; KAPLAN, A.** *Análisis globales de la temperatura de la superficie del mar, el hielo marino y la temperatura del aire marino nocturno desde finales del siglo XIX.* 2003
110. **MEKO, David; STOCKTON, Charles W.; BOGGESS, William R.** The tree-ring record of severe sustained drought 1. *Jawra Journal of the American Water Resources Association*, 1995, vol. 31, n.º 5, p. 789-801.
111. **BELMONTE, E. y Moscoso, D.** Patrones fenológicos de 81 especies de Precordillera y Altiplano de la I Región, 18-19 S. *Revista Gema* (Universidad de Tarapacá), 2, 46-67. 1985.
112. **DONOSO ZEGERS, C.** *Las especies arbóreas de los bosques templados de Chile y Argentina: autoecología.* Marisa Cuneo, ediciones. 2006.

ANEXOS

Anexo 1

Matriz de consistencia

Tabla 5. *Matriz de consistencia*

Problema de investigación	Objetivos	Hipótesis	Variables	Metodología
<p>General ¿Influye la variabilidad climática en el crecimiento radial de <i>Polylepis tarapacana</i> en el bosque del Altiplano peruano de Chiluyo, Tacna?</p> <p>Específicos ¿Tiene <i>Polylepis tarapacana</i> anillos anuales claramente definidos?</p> <p>¿Cómo influye la precipitación y temperatura regional en el crecimiento radial de <i>Polylepis tarapacana</i> en el bosque del Altiplano Peruano de Chiluyo, Tacna?</p> <p>¿Cómo influye la temperatura de la superficie del mar (TSM) de la región 3.4 en el crecimiento radial de <i>Polylepis tarapacana</i> en el bosque del Altiplano peruano de Chiluyo, Tacna?</p>	<p>General Determinar la influencia de la variabilidad climática en el crecimiento radial de <i>Polylepis tarapacana</i> en el bosque del Altiplano peruano de Chiluyo, Tacna.</p> <p>Específicos Determinar la presencia y anualidad de los anillos de crecimiento de <i>P. tarapacana</i> en el bosque del Altiplano peruano de Chiluyo, Tacna. Describir la influencia de la precipitación y temperatura regional en el crecimiento radial de <i>Polylepis tarapacana</i> en el bosque del Altiplano peruano de Chiluyo, Tacna. Describir la influencia de la temperatura de la superficie del mar (TSM) de la región 3.4 en el crecimiento radial de <i>Polylepis tarapacana</i> en el bosque del Altiplano peruano de Chiluyo, Tacna.</p>	<p>General Existe una relación significativa entre el crecimiento de <i>Polylepis tarapacana</i> y la variabilidad climática en el Altiplano. Los anillos de crecimiento anual de esta especie registran las variaciones del clima a lo largo del tiempo.</p> <p>Específicas H₁: <i>P. tarapacana</i> presenta anillos anuales claramente distinguibles en el bosque de Chiluyo, Tacna en el Altiplano peruano. H₂: <i>Polylepis tarapacana</i> es altamente sensible a cambios en la precipitación y temperatura regional en el bosque de Chiluyo, Tacna en el Altiplano peruano. H₃: El crecimiento radial de <i>Polylepis tarapacana</i> es influenciado por los forzantes climáticos como El Niño oscilación del Sur-ENOS. La temperatura de la superficie del mar (TSM) de la región 3.4 tiene una</p>	<p>dependiente Índice de ancho de anillo anual de <i>P. tarapacana</i> Dimensión: Ancho de anillos en (mm)</p> <p>Independiente Precipitación total mensual (mm) Dimensión: Milímetros (mm)</p> <p>Variable 2 Temperatura (°C) Dimensión: Grados Celsius (°C)</p> <p>Variable 3 Temperatura de la superficie del mar - TSM región El Niño 3.4 Dimensión: Grados Celsius (°C)</p>	<p>Tipo de investigación: Básica Nivel de investigación: Descriptivo-correlacional Método general: Inductivo-deductivo Diseño de la investigación: Tipo de diseño: No experimental Población: Bosque de <i>P. tarapacana</i> de un área aproximada de 2.282 ha con individuos entre 100 – 400 por hectárea. Muestra: 30 árboles de <i>P. tarapacana</i> Técnicas de recolección y procesamiento de datos Técnicas dendrocronológicas estándar Selección de sitio de estudio Colecta de muestras dendrocronológicas Lijado y pulido Fechado visual Medición del ancho de anillos Elaboración de la serie maestra Cofechado y control de calidad del fechado Estandarización</p>

		estrecha relación con el ancho de anillos de <i>P. tarapacana</i> en el bosque de Chiluyo, Tacna en el Altiplano peruano.	<p>Elaboración de la cronología final</p> <p>Obtención de data climática</p> <p>Descarga de datos climáticos</p> <p>Análisis y llenado de datos faltantes</p> <p>Obtención de índices regionales de Precipitación y temperatura</p> <p>Análisis de correlación</p>
--	--	---	--

Anexo 2

Evidencias fotográficas del trabajo en campo y laboratorio



Figura 21. Colecta de muestras dendrocronológicas de P. tarapacana en el bosque de Chiluyo, Tacna

Nota. Trabajo colectivo para la colecta de muestras. En la foto Ing. Jimmy Requena, investigador del laboratorio de Dendrocronología de la Universidad Continental.



Figura 22. Fechado de muestras de *P. tarapacana* en el Laboratorio de dendrocronología de la Universidad Continental-Huancayo



Figura 23. Sistema de medición de ancho de anillos de *P. tarapacana*



Figura 24. Muestras dendrocronológicas de *P. tarapacana* utilizados para la elaboración de la cronología

Anexo 3

Análisis de radiocarbono

Tabla 6. Análisis de radiocarbono de *P. tarapacana*

Sample name	Other ID	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	±	fraction Modern	±	D^{14}C (‰)	±	^{14}C age (BP)
1985				1.2133	0.0018	213.3	1.8	Modern
1975				1.3850	0.0020	385.0	2.0	Modern
1963				1.5224	0.0022	522.4	2.2	Modern
1957				1.0651	0.0016	65.1	1.6	Modern

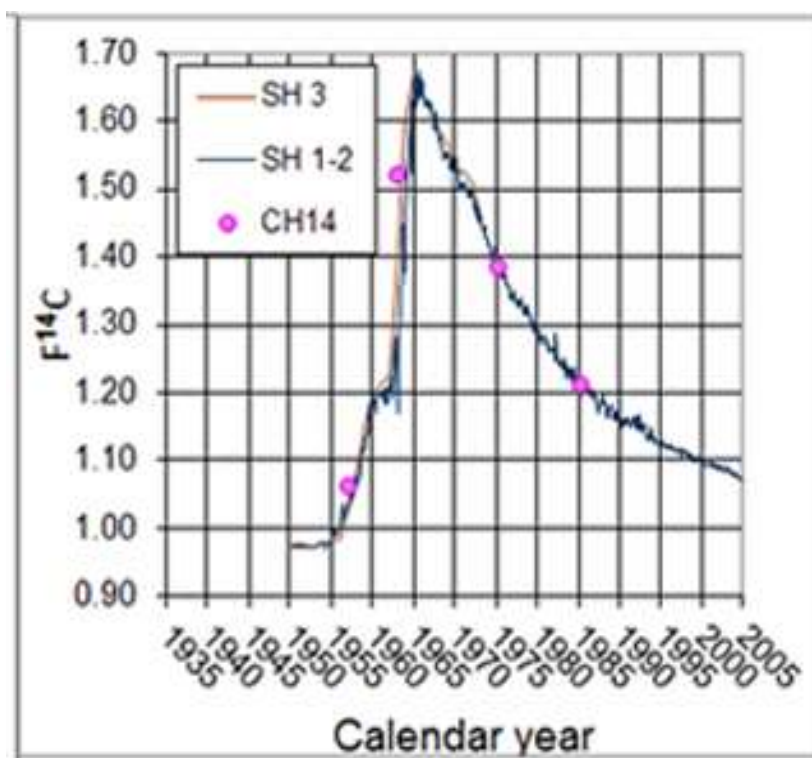


Figura 25. Radiograma del análisis de carbono en *P. tarapacana*

Anexo 4

Años con valores extremos (percentiles 75 y 25)

Tabla 7. Años con valores extremos (percentiles 75 y 25), correspondientes a los valores más altos y bajos para las series de tiempo para el periodo 1870 – 2015

	Ancho de anillos	Precipitación	Temperatura	TSM
	Valores extremos (Percentil 75)			
1	1877=1.865	1985=1.424	1997=1.779	2015=2.627
2	1965=1.773	1971=1.35	2009=1.315	1997=2.463
3	1982=1.561	1986=0.977	1982=1.028	1982=2.223
4	1972=1.462	1975=0.845	1972=0.85	1877=1.877
5	1945=1.452	1990=0.769	1987=0.811	1902=1.522
6	1939=1.409	1978=0.716	2006=0.733	1888=1.515
7	1997=1.406	1992=0.685	2015=0.634	1972=1.512
8	1950=1.4	1996=0.611	2010=0.401	1991=1.341
9	1896=1.379	2011=0.602	2002=0.386	1930=1.284
10	1987=1.359	1972=0.586	2004=0.349	2009=1.278
11	1888=1.349	1977=0.52	1981=0.3	2002=1.261
12	1993=1.347	1984=0.51	1990=0.288	1896=1.257
13	1956=1.347		1965=0.219	1965=1.244
14	1918=1.31			1905=1.241
15	1937=1.278			1940=1.152
16	1943=1.27			1918=1.117
17	1930=1.269			1987=1.111
18	1911=1.267			1899=1.099
19	1994=1.246			1986=1.056
20	1963=1.239			1914=1.05
21	1925=1.232			1957=0.911
22	1923=1.207			1941=0.899
23	1969=1.201			1925=0.894
24	1894=1.189			1994=0.885
25	1899=1.184			2006=0.741
26	1947=1.17			1963=0.722
27	1979=1.169			1904=0.716
28	2015=1.163			1911=0.686
29	1874=1.153			1865=0.667
30	1968=1.153			1969=0.627
31	1905=1.151			1885=0.627
32	1957=1.15			1868=0.620
33	2014=1.147			2014=0.61
34	1895=1.147			2004=0.601
35	2007=1.138			1923=0.585
36	1981=1.136			1913=0.569
37	1903=1.135			1976=0.549

38	1958=1.129			1864=0.542
39				1968=0.495
40				1977=0.492
	RWI	Precipitación	Temperatura	TSM
	Valores negativos extremos (Percentil 25)			
1	1983=0.328	1980=-0.42	2007=-0.447	1875=-0.873
2	1967=0.497	1967=-0.421	1989=-0.467	1903=-0.898
3	1878=0.553	2015=-0.425	1970=-0.549	1995=-0.912
4	1906=0.564	2010=-0.445	1974=-0.641	1971=-0.924
5	1916=0.565	1988=-0.456	1991=-0.702	1944=-0.928
6	1971=0.609	1991=-0.503	2000=-0.774	2011=-0.928
7	1961=0.615	1998=-0.504	1996=-0.838	1908=-0.933
8	1933=0.626	2001=-0.514	1975=-0.849	1870=-0.938
9	1964=0.64	2008=-0.577	1985=-0.860	1950=-0.958
10	1959=0.649	1982=-0.582	1992=-1.002	1910=-0.996
11	1998=0.663	1976=-0.609	1967=-1.208	1984=-1.008
12	1942=0.681	2004=-0.62	1964=-1.313	1964=-1.046
13	1879=0.689	1989=-0.725	1971=-1.315	1869=-1.061
14	1882=0.693			1873=-1.068
15	1898=0.695			1862=-1.088
16	2000=0.699			1917=-1.099
17	1892=0.70			1938=-1.116
18	2011=0.703			1924=-1.153
19	2010=0.706			1879=-1.164
20	1992=0.707			1874=-1.174
21	1890=0.715			1949=-1.248
22	1889=0.719			1909=-1.256
23	1999=0.736			1886=-1.278
24	1974=0.742			1955=-1.284
25	1935=0.753			1933=-1.316
26	1897=0.755			1872=-1.408
27	1886=0.765			1916=-1.443
28	1917=0.766			1998=-1.448
29	1975=0.771			1999=-1.452
30	1954=0.775			1970=-1.469
31	2005=0.785			1893=-1.469
32	1931=0.794			1889=-1.488
33	1870=0.796			2007=-1.56
34	1955=0.804			2010=-1.573
35	1880=0.83			1975=-1.648
36	2012=0.83			1892=-1.734
37				1942=-1.779
38				1988=-1.902
39				1973=-2.096

Anexo 5

Anomalías de la temperatura de la superficie del mar - TSM reconstruido

Tabla 8. Anomalías de la temperatura de la superficie del mar - TSM reconstruido

Año	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Setiemb.	Octubre	Noviem.	Diciem.
1856	0.84	0.97	0.69	0.53	0.51	0.45	0.32	0.18	-0.15	-0.33	-0.85	-1.1
1857	-0.93	-0.81	-0.9	-0.86	-0.87	-0.7	-0.72	-0.66	-0.78	-0.84	-0.82	-0.63
1858	-0.28	-0.05	-0.18	-0.38	-0.42	-0.16	-0.25	-0.21	-0.4	-0.41	-0.67	-0.91
1859	-0.8	-0.58	-0.47	-0.55	-0.47	-0.46	-0.21	-0.08	-0.29	-0.25	-0.45	-0.47
1860	-0.64	-0.73	-0.84	-0.89	-0.74	-0.45	-0.58	-0.71	-0.87	-0.65	-1.01	-0.96
1861	-0.43	-0.18	-0.7	-0.79	-0.9	-0.72	-0.55	-0.57	-0.94	-0.85	-0.84	-0.92
1862	-0.8	-0.62	-0.63	-0.48	-0.32	-0.43	-0.41	-0.29	-0.76	-1	-1.49	-1.42
1863	-1.01	-0.84	-0.99	-0.94	-0.98	-0.93	-0.79	-0.56	-0.77	-0.66	-0.61	-0.57
1864	-0.52	-0.28	-0.42	-0.45	-0.39	-0.2	0.17	0.59	0.51	0.67	0.5	0.38
1865	0.57	0.63	0.46	0.28	0.19	0.25	0.38	0.35	0.26	0.56	0.58	0.66
1866	0.92	1.03	0.99	0.79	0.84	0.9	0.85	0.68	0.23	0.11	-0.04	-0.31
1867	-0.02	0.11	0.19	0.19	0.46	0.73	0.78	0.74	0.51	0.26	0.12	0.14
1868	0.25	0.24	0.02	-0.1	0.05	0.11	0.11	0.2	0.1	0.55	0.79	0.79
1869	0.81	0.69	0.26	-0.03	-0.18	-0.13	-0.28	-0.6	-1.31	-1.03	-1.05	-1.03
1870	-1.08	-0.86	-0.65	-0.51	-0.66	-0.9	-0.96	-0.79	-0.9	-0.97	-1.28	-1
1871	-0.74	-0.73	-0.79	-0.6	-0.56	-0.69	-0.35	-0.36	-0.53	-0.26	-0.34	-0.57
1872	-0.7	-0.65	-0.74	-0.84	-0.77	-0.64	-0.81	-1.03	-1.61	-1.51	-1.47	-1.48
1873	-1.21	-1.16	-1.23	-1.06	-0.73	-0.46	-0.37	-0.54	-0.66	-0.84	-1.33	-1.34
1874	-1.09	-1.14	-1.13	-1.11	-1.07	-1	-1.04	-1.08	-1.34	-1.38	-1.56	-1.18
1875	-0.8	-0.78	-0.64	-0.82	-0.9	-0.69	-0.53	-0.94	-1	-1.04	-0.91	-0.69
1876	-0.84	-0.75	-0.9	-0.95	-0.5	-0.44	-0.33	-0.37	-0.57	-0.1	0.04	0.08
1877	0.43	0.61	0.71	0.96	0.97	1.43	1.62	1.78	1.73	1.69	1.77	1.84
1878	2.09	2.15	1.62	1.19	1.09	1.12	0.79	0.16	-0.32	-0.52	-0.53	-0.54
1879	-0.18	0.16	-0.14	-0.19	-0.41	-0.42	-0.47	-0.91	-1.19	-1.19	-1.26	-1.44
1880	-1.4	-0.5	-0.24	-0.29	-0.35	-0.49	-0.46	-0.31	-0.26	0.04	0.03	0.29
1881	0.57	0.5	0.43	0.36	0.36	0.26	0.1	0.1	-0.21	-0.26	-0.61	-0.84
1882	-0.67	-0.46	-0.36	-0.2	-0.11	-0.49	-0.57	-0.51	-0.62	-0.88	-1.04	-0.86
1883	-0.54	-0.19	-0.09	0	-0.11	0.06	0.11	0.28	-0.21	-0.34	-0.28	-0.37
1884	-0.1	-0.06	-0.2	-0.02	0.2	-0.16	0.03	0.19	0.12	0.39	0.42	0.35
1885	0.55	0.5	0.59	0.59	0.44	0.56	0.49	0.72	0.73	0.95	0.96	0.73
1886	0.4	0	-0.03	-0.06	-0.5	-1.05	-1.03	-1.09	-1.03	-1.29	-1.44	-1.69
1887	-1.22	-0.99	-0.94	-1.03	-0.7	-0.54	-0.27	-0.43	-0.41	-0.3	-0.27	-0.09
1888	0.43	0.81	0.77	0.47	0.42	0.69	0.79	0.79	0.98	1.43	1.65	1.61
1889	1.84	1.59	1.24	0.83	0.64	0.18	-0.44	-0.98	-1.18	-1.42	-1.65	-1.66
1890	-1.85	-1.16	-1.08	-0.92	-0.96	-0.92	-0.9	-1.01	-1.27	-1.36	-1.18	-0.57
1891	-0.09	0.09	-0.08	0.15	0.33	0.39	0.23	0.16	-0.15	-0.02	-0.12	-0.25
1893	-1.53	-1.54	-1.33	-1.31	-1.33	-1.26	-1.14	-1.27	-1.56	-1.62	-1.6	-1.47
1894	-1.37	-1.19	-1.32	-1.27	-1.2	-0.85	-0.54	-0.82	-0.88	-0.6	-0.36	-0.44
1895	-0.34	-0.31	-0.26	-0.22	-0.29	-0.36	-0.37	-0.15	-0.08	0	0.21	0.07
1896	0.1	0.29	0.08	0.1	-0.08	0.17	0.5	0.96	0.75	1.05	1.32	1.61
1897	1.6	1.22	0.64	0	-0.19	-0.04	-0.07	-0.33	-0.49	-0.74	-1	-0.74

Año	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Setiemb.	Octubre	Noviem.	Diciem.
1898	-0.54	-0.56	-0.67	-0.46	-0.5	-0.34	-0.52	-0.56	-0.72	-0.7	-0.93	-1.15
1899	-0.87	-0.57	-0.47	-0.22	0.08	0.08	0.36	0.7	0.61	1.02	1.21	1.26
1900	1.26	1.24	0.8	0.75	0.69	0.61	0.48	0.44	0.28	0.33	0.12	0.4
1901	0.52	0.27	-0.12	-0.1	-0.32	-0.29	-0.39	-0.33	-0.44	-0.4	-0.56	-0.61
1902	-0.17	0.21	0.3	0.39	0.63	0.85	1.48	1.54	1.42	1.58	1.68	1.62
1903	1.5	1.34	0.95	0.58	0.18	0.02	-0.26	-0.36	-0.72	-0.63	-0.99	-1.28
1904	-0.98	-0.78	-0.58	-0.32	-0.08	0.16	0.24	0.34	0.08	0.47	0.55	0.82
1905	1.16	1.22	1.21	1.03	1.18	1.21	1.24	1.32	1.42	1.37	1.28	1.31
1906	1.2	0.87	0.61	0.52	0.09	0.29	0.12	-0.33	-0.55	-0.74	-0.82	-0.67
1907	-0.57	-0.45	-0.42	-0.13	0.19	0.48	0.46	0.27	0	-0.15	-0.57	-0.23
1908	-0.12	0.08	-0.69	-0.73	-0.57	-0.55	-0.81	-0.45	-0.76	-0.84	-1.16	-1.23
1909	-0.9	-0.7	-0.84	-0.54	-0.43	-0.48	-0.39	-0.23	-0.83	-1.22	-1.55	-1.4
1910	-1.18	-1.35	-1.31	-1.5	-1.4	-1.09	-0.99	-1.17	-1.15	-1	-1.16	-1.06
1911	-0.76	-0.84	-0.85	-0.8	-0.55	-0.33	-0.17	-0.02	0.1	0.46	0.72	0.76
1912	1.02	1.06	0.65	0.63	0.44	0.25	-0.12	-0.26	-0.44	-0.18	-0.12	-0.27
1913	-0.05	0.16	-0.23	-0.3	-0.15	0	0.07	0.2	0.03	0.3	0.59	0.72
1914	0.92	0.86	0.63	0.96	0.87	0.76	0.76	0.99	0.81	0.97	0.94	1.02
1915	1.25	1.32	1.19	0.91	1.02	1.05	1.02	0.6	0.09	0.07	-0.12	-0.46
1916	-0.48	-0.45	-0.66	-0.68	-0.72	-0.68	-0.81	-1.05	-1.37	-1.31	-1.48	-1.68
1917	-1.62	-1.19	-1.31	-0.87	-0.49	-0.13	-0.13	-0.46	-0.84	-1.06	-1.24	-1.38
1918	-1.2	-0.87	-0.58	-0.31	-0.06	0.24	0.45	0.5	0.65	1.11	1.12	1.14
1919	1.33	1.36	1.12	0.84	0.48	0.44	0.39	0.34	0.29	0.19	0.29	0.56
1920	0.72	0.85	0.66	0.72	0.65	0.85	0.67	0.41	-0.02	-0.12	-0.46	-0.81
1921	-0.54	-1.04	-2.03	-0.93	-0.61	-0.4	-0.28	-0.04	-0.25	-0.21	-0.54	-0.39
1922	-0.32	0.22	0.14	-0.21	0.01	-0.11	-0.45	-0.91	-0.64	-0.6	-0.45	-0.61
1923	-0.71	-0.53	-0.21	-0.01	0.14	0.2	0.1	0.75	0.46	0.46	0.53	0.59
1924	0.65	0.83	0.45	0.03	-0.53	-0.39	-0.43	-0.55	-0.88	-1.02	-1.51	-1.13
1925	-1.42	-0.95	-0.72	-0.39	-0.53	-0.32	0.11	0.55	0.29	0.46	0.98	1.31
1926	1.27	1.06	0.95	0.64	0.3	0.3	0.51	0.35	-0.26	-0.35	-0.29	-0.52
1927	-0.5	0.04	-0.4	-0.46	-0.46	-0.13	-0.31	-0.06	-0.14	0.13	-0.03	-0.11
1928	0.01	0.03	-0.46	-0.07	0.13	0.04	0.19	0.07	-0.08	-0.25	-0.38	-0.42
1929	-0.31	-0.01	-0.23	-0.07	-0.2	0.11	0.19	0.29	0.19	0.31	0.49	0.55
1930	0.4	0.35	0.31	0.44	0.09	0.31	0.8	0.76	0.91	1.08	1.63	1.32
1931	1.43	1.34	1.01	0.93	0.67	0.54	0.24	0.01	-0.74	-0.94	-0.62	-0.74
1932	-0.77	-0.42	0.12	0	0.02	0.02	-0.18	-0.14	-0.29	-0.25	-0.26	-0.56
1933	-0.65	-0.36	-0.48	-0.52	-0.76	-0.95	-0.76	-1.17	-1.23	-1.42	-1.49	-1.59
1934	-1.05	-1.11	-1.04	-0.57	-0.29	-0.26	-0.41	-0.2	-0.62	-0.65	-0.3	-0.11
1935	-0.4	-0.1	-0.66	-0.82	-0.81	-0.34	-0.56	0.08	-0.18	0.14	-0.26	-0.51
1936	0.3	0.24	-0.1	0.01	-0.01	-0.34	-0.19	-0.19	-0.2	0.16	-0.05	-0.06
1937	-0.49	0	0	-0.1	-0.44	-0.42	-0.19	-0.44	-0.22	-0.43	-0.28	-0.55
1938	-0.61	-0.5	-0.53	-0.59	-0.72	-0.86	-1.43	-0.98	-0.95	-1.01	-1.27	-1.15
1939	-1.17	-1.14	-0.96	-0.32	-0.26	0.05	-0.04	0.01	-0.21	-0.46	-0.11	0.39
1940	1.11	1.34	1.57	1.34	1.2	0.94	0.71	0.55	0.27	0.57	1.05	1.4
1941	1.73	1.9	1.79	1.57	1.61	1.75	1.15	0.74	0.5	0.75	1.49	1.4
1942	0.73	0.53	0.37	0.6	0.01	-0.41	-0.73	-1.21	-1.8	-1.91	-1.87	-1.66

Año	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Setiemb.	Octubre	Noviem.	Diciem.
1943	-1.78	-1.65	-1.28	-0.89	-0.31	-0.18	-0.02	-0.1	-0.64	-1.01	-0.88	-0.92
1944	-0.76	-0.19	-0.31	-0.32	-0.11	0.06	0.04	-0.25	-1.08	-0.87	-0.95	-0.83
1945	-0.94	-0.89	-0.96	-0.8	-0.59	-0.26	-0.72	-0.75	-0.94	-0.71	-0.53	-0.37
1946	-0.29	-0.32	-0.47	-0.7	-0.41	-0.08	0.04	-0.76	-0.69	-0.26	-0.15	-0.36
1947	-0.03	-0.08	0.04	-0.11	-0.21	0.22	0.26	-0.02	-0.66	-0.78	-0.7	-0.43
1948	-0.21	0.2	0.26	0.09	0.2	0.11	-0.03	-0.25	-0.71	-0.98	-0.74	-0.25
1949	-0.49	-0.14	-0.8	-0.18	0.04	-0.6	-0.5	-0.42	-0.68	-1.01	-1.52	-1.53
1950	-1.19	-1.55	-1.22	-1.07	-1.44	-0.76	-0.65	-0.61	-1.22	-0.88	-1.14	-0.99
1951	-0.89	-0.62	-0.41	-0.22	-0.14	0.19	0.31	0.31	0.35	0.3	0.36	0.1
1952	0.23	0.22	-0.18	0.28	0	-0.47	-0.34	-0.3	-0.31	-0.15	-0.57	-0.56
1953	0.17	0.17	-0.14	0.29	0.25	0.37	0.22	0.19	0.44	0.26	0.09	0.06
1954	0.39	0.31	0.09	-0.37	-0.38	-0.43	-0.74	-0.72	-1.05	-0.74	-0.77	-1.05
1955	-0.59	-0.5	-0.53	-0.55	-0.92	-0.67	-0.63	-0.71	-0.99	-1.43	-1.95	-1.68
1956	-1.05	-0.6	-0.79	-0.84	-0.67	-0.78	-0.72	-0.77	-0.93	-0.79	-1.09	-0.79
1957	-0.63	-0.14	0.2	0.34	0.4	0.25	0.57	0.86	0.31	0.54	0.91	0.89
1958	1.47	1.35	0.91	0.41	0.43	0.37	0.11	0.21	-0.34	-0.01	-0.05	0.21
1959	0.38	0.33	-0.05	0.19	0.07	-0.3	-0.51	-0.62	-0.86	-0.22	-0.42	-0.39
1960	-0.28	-0.33	0.04	0.01	-0.07	-0.21	-0.26	0.13	-0.1	-0.48	-0.42	-0.41
1961	-0.32	0.02	-0.15	0.09	0.06	0.59	0.05	-0.45	-0.8	-0.75	-0.54	-0.47
1962	-0.52	-0.33	-0.39	-0.43	-0.49	-0.2	-0.08	-0.14	-0.63	-0.6	-0.71	-0.84
1963	-0.64	-0.34	-0.14	-0.08	0.05	0.29	0.82	0.89	0.77	0.82	0.75	0.93
1964	0.71	0.36	-0.45	-0.55	-0.83	-0.94	-0.96	-0.78	-1.18	-1.11	-1.35	-1.37
1965	-0.85	-0.41	-0.52	-0.29	0.31	0.56	0.75	1.11	1.17	1.44	1.43	1.3
1966	1.22	0.91	0.79	0.45	0.04	0.33	0.35	-0.05	-0.13	-0.12	-0.24	-0.45
1967	-0.55	-0.39	-0.51	-0.81	-0.54	-0.05	-0.03	-0.46	-0.9	-0.71	-0.64	-0.82
1968	-0.88	-0.87	-0.84	-0.67	-0.48	0.21	0.46	0.25	-0.21	0.05	0.46	0.52
1969	1.17	0.99	0.38	0.12	0.52	0.36	0.16	0.17	0.39	0.62	0.56	0.63
1970	0.82	0.75	0.42	0.39	0.13	-0.43	-1.07	-1.19	-1.34	-1.11	-1.45	-1.88
1971	-1.68	-1.35	-1.44	-1.01	-0.85	-0.92	-0.62	-0.53	-1.04	-1.08	-1.13	-1.28
1972	-0.66	-0.35	-0.29	0.02	0.18	0.61	0.72	1.17	1.01	1.66	1.94	1.77
1973	1.38	1.32	0.63	-0.11	-1.08	-1.29	-1.11	-1.68	-1.63	-1.94	-2.61	-2.51
1974	-2.08	-1.8	-1.36	-1.22	-0.87	-0.56	-1.08	-0.53	-0.66	-0.84	-1.21	-0.99
1975	-0.32	-0.53	-0.91	-0.75	-0.97	-1.23	-1.31	-1.21	-1.28	-1.61	-1.75	-1.96
1976	-1.97	-1.31	-0.72	-0.51	-0.54	-0.15	-0.14	0.34	0.53	0.66	0.54	0.43
1977	0.78	0.36	0.1	-0.31	0.19	0.47	0.27	0.03	-0.03	0.39	0.76	0.73
1978	0.72	0.39	0.1	-0.53	-0.39	-0.56	-0.51	-0.66	-0.68	-0.91	-0.37	-0.34
1979	-0.03	0.1	0.1	0.19	0.03	0.05	-0.39	-0.13	0.29	-0.06	-0.08	0.36
1980	0.38	0.28	0.07	0.18	-0.02	0.36	-0.1	-0.12	-0.29	-0.37	-0.16	0.13
1981	-0.56	-0.56	-0.3	-0.7	-0.43	-0.38	-0.82	-0.72	-0.47	-0.37	-0.98	-0.5
1982	0.15	-0.02	-0.02	0.24	0.69	1.1	0.88	1.11	1.39	1.95	2.16	2.64
1983	2.79	2.41	1.81	1.13	1.04	0.59	-0.15	-0.29	-0.28	-0.82	-1.07	-0.98
1984	-0.93	-0.33	-0.36	-0.39	-0.46	-0.79	-0.48	-0.48	-0.29	-0.76	-1.24	-1.57
1985	-1.14	-1.05	-0.99	-0.98	-0.74	-0.79	-0.53	-0.32	-0.47	-0.5	-0.46	-0.46
1986	-0.78	-0.78	-0.57	-0.34	-0.35	0.04	0.15	0.33	0.61	0.88	1.08	1.13
1987	1.34	1.3	1.25	1.02	0.9	1.38	1.58	1.76	1.67	1.38	1.34	1.03

Año	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Setiemb.	Octubre	Noviem.	Diciem.
1988	0.75	0.5	0.09	-0.46	-1.37	-1.54	-1.65	-1.58	-1.29	-2.07	-2.38	-2.24
1989	-2.04	-1.39	-1.32	-1.09	-0.76	-0.67	-0.48	-0.49	-0.47	-0.43	-0.41	-0.19
1990	-0.02	0.23	0.24	0.24	0.21	-0.07	0.03	0.23	0.03	0.29	0.07	0.34
1991	0.44	0.21	0.03	0.2	0.5	0.71	0.7	0.62	0.35	0.94	1.21	1.8
1992	1.84	1.91	1.61	1.36	1.14	0.37	0.31	-0.18	-0.24	-0.35	-0.14	0.16
1993	0.12	0.25	0.44	0.81	0.97	0.63	0.33	0.02	0.2	0.24	0.26	0.19
1994	0.03	-0.13	0.05	0.12	0.19	0.34	0.13	0.53	0.28	0.8	1.22	1.3
1995	0.98	0.73	0.41	0.15	-0.12	-0.06	-0.21	-0.49	-0.76	-1.02	-0.99	-1
1996	-0.83	-0.87	-0.6	-0.42	-0.48	-0.33	-0.13	-0.26	-0.37	-0.45	-0.46	-0.55
1997	-0.61	-0.36	-0.19	0.25	0.75	1.29	1.7	2.02	2.21	2.54	2.67	2.69
1998	2.53	2.14	1.45	0.78	0.62	-0.93	-1.28	-1.33	-1.11	-1.35	-1.47	-1.78
1999	-1.67	-1.31	-0.97	-0.94	-0.88	-1.05	-0.87	-1.23	-1.01	-1.05	-1.53	-1.67
2000	-1.92	-1.53	-1.14	-0.77	-0.73	-0.62	-0.5	-0.37	-0.51	-0.73	-0.87	-0.98
2001	-0.83	-0.61	-0.38	-0.26	-0.25	0.03	0.1	0.05	-0.17	-0.1	-0.2	-0.4
2002	-0.07	0.23	0.1	0.16	0.3	0.78	0.76	0.97	1.11	1.36	1.62	1.52
2003	1.19	0.77	0.59	0.03	-0.48	-0.17	0.21	0.03	0.24	0.5	0.4	0.32
2004	0.17	0.14	-0.12	0.06	0.21	0.11	0.47	0.72	0.75	0.69	0.66	0.74
2005	0.53	0.24	0.33	0.29	0.35	0.4	0.25	0.06	-0.09	0.06	-0.31	-0.68
2006	-0.93	-0.64	-0.65	-0.19	0.06	0.2	0.13	0.4	0.62	0.78	1.08	1.19
2007	0.69	0.09	-0.04	0	-0.28	-0.1	-0.43	-0.62	-0.95	-1.47	-1.59	-1.6
2008	-1.86	-1.89	-1.15	-0.95	-0.67	-0.48	-0.03	0.03	-0.28	-0.36	-0.35	-0.83
2009	-1.03	-0.68	-0.55	-0.27	0.18	0.47	0.72	0.71	0.75	0.94	1.54	1.72
2010	1.5	1.22	1.08	0.59	-0.17	-0.65	-1.13	-1.32	-1.65	-1.68	-1.58	-1.62
2011	-1.64	-1.27	-0.98	-0.76	-0.43	-0.18	-0.26	-0.64	-0.74	-0.97	-1.05	-1.04
2012	-1.08	-0.69	-0.58	-0.39	-0.05	0.31	0.53	0.73	0.51	0.29	0.36	-0.11
2013	-0.41	-0.4	-0.22	-0.1	-0.27	-0.21	-0.31	-0.28	-0.07	-0.33	0.01	-0.04
2014	-0.51	-0.55	-0.22	0.24	0.46	0.46	0.18	0.2	0.45	0.49	0.85	0.78
2015	0.53	0.56	0.58	0.78	1.03	1.32	1.6	2.07	2.28	2.46	2.95	2.82

Anexo 6

Índice de precipitación regionalizado

Tabla 9. Índice de precipitación regionalizado

Año	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Setiemb.	Octubre	Noviem.	Diciem.
1967	-1.35	0.05	0.73	-0.8	0.03	-0.42	0.25	-0.12	1.32	-0.59	-0.92	0.15
1968	-0.49	0.38	0.1	-0.46	2.48	0.16	0.07	-0.47	-0.04	1.58	1.84	-0.22
1969	-0.33	-0.38	-0.79	-0.85	1.5	-0.32	-0.35	-0.49	0.15	-0.58	-0.17	-0.2
1970	-0.51	-0.35	-0.18	-0.74	0.02	-0.4	-0.44	-0.47	-0.43	-0.26	-0.67	-0.14
1971	-0.01	0.8	-0.85	-0.36	-0.53	-0.31	-0.43	-0.39	-0.46	-0.62	1.99	0.73
1972	1.32	0.47	0.85	0.12	0.54	-0.32	-0.43	-0.46	0.18	0.85	-0.27	0.77
1973	1.25	0.22	-0.07	0.7	-0.17	-0.4	-0.18	0.1	0.64	-0.57	-0.5	-0.68
1974	2.19	0.92	-0.5	0.03	-0.53	0.06	-0.35	3.89	0.16	-0.46	-0.54	0.29
1975	0.34	1.03	0.47	-0.7	1.53	-0.16	-0.43	-0.39	1.24	-0.27	-0.49	1.72
1976	1.3	0.02	0.01	-0.61	0.92	-0.33	0.12	0.44	1.02	-0.72	-0.77	-0.26
1977	-0.79	1.24	0.72	-0.69	1.11	-0.41	-0.08	-0.46	0.17	-0.06	0.58	0.38
1978	0.6	-0.58	-0.33	0.02	-0.44	-0.41	-0.34	-0.18	-0.32	0.04	1.61	0.07
1979	0.46	-0.99	0.67	-0.7	-0.51	-0.39	-0.31	-0.48	-0.2	0.14	-0.55	1.05
1980	-1.32	-0.75	1.03	-0.63	-0.46	-0.41	-0.06	-0.16	0.32	1.43	-0.64	-0.49
1981	-0.14	1.35	0.23	0.52	-0.32	-0.41	-0.42	0.22	-0.2	-0.42	-0.18	0.86
1982	0.27	-0.73	-0.29	0.15	-0.28	-0.28	-0.35	-0.45	1.29	2.8	0.59	-0.69
1983	-1.65	-0.88	-0.95	-0.35	-0.31	0.07	-0.3	-0.22	1.52	-0.46	-0.68	-0.43
1984	1.6	1.95	1.22	-0.59	-0.3	2.15	-0.35	-0.04	-0.44	5.73	2.3	-0.32
1985	-0.45	1.55	-0.06	0.71	-0.16	0.19	-0.41	-0.29	0.37	0.05	2.83	1.23
1986	0.21	0.56	0.93	0.32	-0.24	-0.38	-0.3	0.27	-0.12	-0.59	0.53	1.44
1987	0.96	-0.69	-0.98	-0.69	0.13	0.8	2.51	-0.48	-0.16	1.51	0.17	-0.86
1988	0.12	-0.98	-0.02	0.89	0.05	-0.34	-0.18	-0.48	0.15	-0.43	-0.65	-0.28
1989	-0.44	0.19	0	1	-0.45	-0.2	-0.3	-0.4	-0.31	-0.58	-0.65	-0.94
1990	-0.59	-0.93	-0.54	-0.07	2.05	2.83	-0.23	-0.18	-0.36	0.72	0.62	1.47

Año	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Setiemb.	Octubre	Noviem.	Diciem.
1991	0.22	-0.64	0.58	-0.03	-0.15	0.52	-0.35	-0.46	-0.38	0.07	-0.13	-0.77
1992	-0.61	-1.02	-1.19	-0.72	-0.5	-0.3	-0.3	0.1	-0.42	0.04	0.54	0.79
1993	0.73	-0.97	0.07	-0.57	-0.26	-0.29	-0.39	3.16	-0.07	0.68	0.13	0.8
1994	-0.25	0.56	-0.63	1.28	-0.08	-0.39	-0.39	-0.43	-0.11	-0.52	-0.4	0.83
1995	-0.72	-0.93	0.54	-0.19	-0.21	-0.41	-0.4	-0.36	-0.26	-0.54	-0.36	-0.16
1996	-0.09	-0.28	-0.68	-0.39	-0.15	-0.39	-0.35	0.16	-0.36	-0.28	0.56	-0.06
1997	1.34	0.66	-0.61	-0.24	0.13	-0.34	-0.4	1.1	3.61	-0.49	-0.11	-0.39
1998	0.37	-0.74	-0.78	-0.67	-0.5	1.44	-0.41	-0.31	-0.4	-0.35	-0.15	-0.71
1999	-0.65	1.2	2.2	0.63	-0.13	-0.41	-0.37	-0.44	0.1	0.5	-0.67	-0.39
2000	0.47	0.29	-0.09	-0.42	-0.22	-0.33	0.19	-0.32	-0.34	0.75	-0.71	-0.25
2001	1.4	1.57	1.11	0.72	-0.2	-0.34	-0.3	0.15	-0.29	-0.01	-0.45	-0.1
2002	-0.99	0.57	0.47	0.58	0.4	0.22	1.64	-0.23	-0.28	1.07	0.31	-0.29
2003	-0.77	-0.5	0.11	-0.67	2.02	-0.38	0.39	-0.3	-0.23	-0.52	-0.56	-0.2
2004	0.3	0.17	-0.48	-0.67	-0.39	-0.39	1.45	1.17	-0.2	-0.63	-0.69	-0.47
2005	-0.7	0.71	-0.71	-0.06	-0.49	-0.41	-0.34	-0.48	1.2	-0.32	-0.13	0.17
2006	0.7	-0.22	0.44	-0.3	-0.3	-0.41	-0.41	-0.46	-0.26	-0.17	-0.1	-0.36
2007	-0.5	-0.32	0.25	-0.42	-0.36	-0.38	-0.33	-0.47	0.01	-0.31	0	-0.48
2008	0.32	-0.75	-0.6	-0.84	-0.44	-0.37	-0.4	-0.06	-0.44	-0.37	-0.67	0.26
2009	-1.32	-0.01	-0.16	0.64	-0.48	-0.4	-0.24	-0.48	-0.17	-0.45	0.42	-0.38
2010	-0.81	-0.32	-0.91	0.31	0.38	-0.41	-0.39	-0.38	-0.42	-0.13	-0.71	0.07
2011	-0.69	0.58	-0.69	0.11	1.45	-0.22	0.42	-0.47	0.16	-0.53	-0.27	1.82
2012	0.26	1.08	-0.15	0.69	-0.52	-0.42	-0.31	-0.43	-0.35	-0.49	-0.44	0.77
2013	0.18	-0.31	-0.44	-0.78	2.04	1	-0.19	-0.04	-0.4	0.35	-0.42	0.54
2014	-0.12	-1.12	-0.82	0.56	0.25	-0.4	-0.33	0.05	1.13	0.76	0.07	0
2015	-0.62	0.06	0.58	2.35	-0.21	-0.4	-0.15	0.48	0.09	0	-0.16	-0.69

Anexo 7
Índice de temperatura regional

Tabla 10. Índice de temperatura regional

Año	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Setiemb.	Octubre	Noviem.	Diciem.
1967	0.33	0.02	-0.29	-0.9	0.15	0.03	-0.53	-0.48	0.25	-0.81	-0.69	-2.11
1968	-0.94	-0.78	-1.52	-1.86	-0.87	-0.24	-0.8	-0.64	-0.73	0.68	-0.55	-0.88
1969	-0.91	0.39	0.71	0.88	0.61	0.53	0.15	-0.93	0.3	0.35	0.79	0.21
1970	-0.09	-0.3	-1.1	-0.25	0.41	1.22	0.37	0.36	0.25	0.31	0.16	-0.79
1971	-0.26	-1.6	-0.26	-0.95	-1.31	-0.23	-1.24	-0.62	-0.83	-2.66	-1.65	-1.3
1972	-1.57	-1.31	-0.74	-0.35	-0.74	-0.9	0.75	-0.26	0.23	0.14	0.88	-0.24
1973	1.1	1.38	1.13	1.67	1.39	-0.31	-0.08	0.19	0.25	1.42	0.91	-0.08
1974	-0.94	-0.57	-0.56	-0.33	-0.63	-0.24	1.36	-1.31	-0.02	-0.56	-0.18	-0.74
1975	-1.36	-0.61	-0.31	0.15	0.15	0.06	-1.77	-0.48	-0.29	-1.8	-0.84	-1.2
1976	-1.38	-0.5	-0.31	-1.91	-1.06	-0.52	0.46	-0.92	-0.26	-1.37	-1.29	-0.39
1977	0.64	0.2	0.01	-0.68	-1.17	-1.65	0.52	-0.55	0.08	-0.4	0.19	-0.66
1978	-0.51	0.06	-0.47	0.01	-0.4	-0.13	-1.5	0.33	-1.08	-0.71	-0.08	-0.38
1979	-0.84	0.21	0.34	-0.92	-0.88	0.83	-0.22	-0.23	0.28	-0.15	0.55	-0.76
1980	0.25	0.35	0.04	-0.61	-0.38	0.72	1.63	0.53	0.14	0.47	0.39	-0.74
1981	0.49	-0.12	-0.01	-1.14	-0.19	-1.16	0.14	-0.25	-1.1	0.13	0.88	0.78
1982	-0.33	0.38	-0.2	-1.26	-1.55	-1.13	0.06	0.18	-0.1	0.02	0.7	-0.12
1983	1.33	1.06	2.17	1.79	0.88	0.52	1.6	1.52	0.63	-0.62	-0.47	0.45
1984	-0.89	-0.73	0.21	-0.14	0.91	0.95	0.28	-0.37	-1.23	0.83	0.1	-0.5
1985	-0.75	-0.75	-0.31	0.12	1.01	0.53	-0.84	0.61	0.38	-0.69	-1.38	-1.22
1986	-0.36	-0.89	-0.44	-0.06	-1.48	-0.16	-1.48	-0.51	-0.2	-1.28	0.26	-0.12
1987	0.2	-0.05	-0.12	0.34	0.76	0.27	0.81	0.79	0.3	-0.09	0.95	1.03
1988	0.78	0.65	0.64	0.74	0.73	-0.29	0.46	0.92	1	-0.06	-0.09	0.05
1989	-0.45	-0.58	-0.43	-0.54	0.07	0.72	-0.24	0.06	0.19	0.38	-1.01	0.28

Año	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Setiemb.	Octubre	Noviem.	Diciem.
1990	-0.25	-0.67	-0.7	-0.11	0.25	-0.15	-0.6	-0.17	-0.55	0.75	0.49	-0.08
1991	-0.07	0.61	0.49	-0.02	0.1	-0.71	-0.09	-0.05	-0.5	-0.23	-0.8	-0.88
1992	-0.74	-0.44	-0.65	-0.62	0.44	0.56	-0.45	-1.77	-1.01	-0.83	-1.37	-0.46
1993	-0.96	-1.28	-0.93	0.06	0.11	-0.39	-0.11	-0.74	-0.13	0.12	0.57	0.79
1994	0.2	-0.1	-0.52	0.65	0.12	-0.36	0.14	0.04	0.56	-0.78	0.31	0.07
1995	0.44	0.15	-0.16	-0.29	-0.17	-0.63	0.62	1.24	0.91	0.14	0.03	-1.24
1996	-0.48	0.05	-0.12	0.32	0.17	-0.53	-0.68	0.35	-0.47	-0.05	-0.75	-0.78
1997	-0.41	-0.9	-1.36	-2.17	-1.05	-1.15	0.42	-0.4	0.78	-0.21	0.39	1.29
1998	2.52	2.53	2.17	1.25	-0.25	1.03	1.08	0.6	-0.27	0.32	-0.04	0.81
1999	0.23	-0.04	-0.1	-0.17	0.13	-0.57	0.45	0.23	-0.65	-0.77	-1.04	0.02
2000	-0.3	-0.32	-0.15	-0.25	0.42	-0.48	-1.14	0.18	-0.23	-0.75	-0.64	-1.14
2001	-1.24	-0.36	-0.49	-0.2	-0.04	0.4	-0.37	-0.37	0.55	-0.07	0.79	-0.67
2002	0.19	0.3	0.41	0.03	0.76	1.05	-0.09	0.07	0.47	0.33	0.22	0.07
2003	0.63	0.78	0.23	-0.31	0.13	-0.56	0.13	-0.67	-1.35	-0.47	-0.15	0.49
2004	-0.35	0.01	0.54	0.4	-1.5	-0.86	0.18	0.15	0.1	0.01	-0.02	0.73
2005	0.29	-0.15	0.9	0.34	-0.33	-1.15	0.59	-1.01	-0.51	-0.18	-0.12	0.31
2006	-0.8	0.24	0.95	0.2	-0.96	-0.01	-0.55	0.57	-0.25	0.97	0.96	0.85
2007	0.89	0.78	0.18	0.94	0.86	1.51	0.22	0.93	0.76	0.52	-0.82	-0.29
2008	-0.24	-0.2	-0.69	-1.16	-1.75	-0.09	-0.4	-0.69	-0.71	0.21	0.66	-0.4
2009	-0.01	0.36	-0.37	-0.36	-0.05	-1.03	0.63	-1	0.52	0.95	1.53	0.66
2010	1.14	1.79	1.46	1.17	0.84	1.78	0.31	0.76	0.82	0.42	-0.28	0.99
2011	1.32	-0.05	0.02	-0.02	0.34	0.47	0.28	0.71	0.41	-0.02	0.69	-0.62
2012	-0.53	-0.75	-0.68	-0.1	-0.57	-0.14	0.4	-0.45	0.29	0.52	0.55	-0.03
2013	-0.9	0.17	-0.25	-1.31	0.57	0.09	1.53	-0.14	-0.94	-0.29	0.64	0.17
2014	-0.48	-0.04	-0.4	-0.11	0.18	0.82	0.24	0.08	1.6	0.93	0.23	0.58
015	-0.9	-0.05	0.4	0.04	-0.26	1.16	0.05	-0.47	-0.21	-0.12	0.9	0.37