



Universidad Austral de Chile

Facultad de Ciencias Forestales y Recursos Naturales

Estudio dendrocronológico de una población de *Polylepis rugulosa* en los Andes semiáridos de Arica y Parinacota

Patrocinante: Sr. Duncan Christie B.

Trabajo de Titulación presentado como parte
de los requisitos para optar al Título de
Ingeniero en Conservación de Recursos Naturales

VIVIANA ANDREA SILVA OSSES

VALDIVIA

2012

Calificación del Comité de Titulación

	Nota
Patrocinante: Sr. Duncan Christie Browne	7.0
Informante : Sr. Jorge Silva Martínez	7.0
Informante : Sr. Juan Llancabure Jara	7.0

El Patrocinante acredita que el presente Trabajo de Titulación cumple con los requisitos de contenido y de forma contemplados en el Reglamento de Titulación de la Escuela. Del mismo modo, acredita que en el presente documento han sido consideradas las sugerencias y modificaciones propuestas por los demás integrantes del Comité de Titulación.

Sr. Duncan Christie B.

AGRADECIMIENTOS

Quiero comenzar primeramente agradeciendo a mis familiares más cercanos que han apoyado mi formación académica. A mis padres Marcelo y Marcela, por haberme dado la oportunidad de estudiar y por compartir conmigo el cuidado y crianza del polo, a mi abuelita lela por su apoyo incondicional, a mi tía Mirtha por hacerme parte de su familia, junto a la abuelita Olga, Susi, tío Nano y tío Mery.

Esta grata aventura universitaria me ha proporcionado inmensas alegrías y la oportunidad de conocer a personas maravillosas que han compartido junto a mí cada momento en estos últimos 5 años, quiero mencionar principalmente a; Ronnie, Nata, Joce, Naya, Flavio y por su puesto Ale Portales. Ronnie a pesar de cada comienzo, siempre has estado ahí presente, siendo mi profesor forestin. Nata te has convertido en mi segunda madre, siendo la más comprensiva y fiel. Joce eres la mejor, así como una vez me lo dijiste a mí, me alegras inmensamente. Naya mi eterna sicóloga, juntas sacamos cada rollo, eres mi cantante favorita. Flavio eres un excelente amigo y persona. Y por último pero no menos importante la Ale, por su amistad, consejos, y ayudas burocráticas, ya que para mí y para muchos es la merecida directora de escuela. Muchas gracias a todos.

No puedo dejar de agradecer a todos los del mundo dendroide, que con sus conocimientos otorgados han permitido el desarrollo exitoso de mi tesis, a Emilio, Jorge, Profe Duncan y Llanca, puede decir que no me equivoque en elegir mi *Polylepis rugulosa*, aunque fue un largo camino.

Mi mayor agradecimiento es para el hombrecito que me espera todos los días, y al que deseo retribuir cada espera y cada segundo que pasó solito, para que yo estudie, a mi gatito miau miau, mi hijo.

Muchas gracias a todas las personas que me han acompañado durante este viaje, y en especial doy Gracias a Dios por ésta oportunidad.

Este trabajo es dedicado a mi bebe pollo, que a mi lado ha revisado cada figura.

	Resumen	
	Summary	
1	INTRODUCCIÓN	1
2	Estado del arte	4
2.1	Relevancia ecológica de <i>Polylepis rugulosa</i>	4
2.4	Avances dendrocronológicos para el género	4
3	MATERIAL Y MÉTODOS	7
3.1	Área de estudio	7
3.2	Desarrollo de la cronología de ancho de anillos	10
3.2.1	Obtención de las muestras	10
3.2.2	Procesamiento de las muestras	10
3.3	Construcción de la cronología de ancho de anillos	11
3.4	Crecimiento radial acumulado	12
3.5	Relación entre el clima y el crecimiento radial	12
3.6	Relaciones entre el crecimiento de <i>Polylepis rugulosa</i> y <i>Polylepis tarapacana</i>	13
4	RESULTADOS	14
4.1	Cronología de ancho de anillos	14
4.2	Crecimiento radial	15
4.3	Relación con variables climáticas	16
4.3.1	Funciones de correlación	16
4.4	Relación entre <i>Polylepis rugulosa</i> y <i>Polylepis tarapacana</i>	19
5	DISCUSIÓN	21
5.1	Cofechado de muestras	21
5.2	Tasas de crecimiento radial	21
5.3	Relación con variables climáticas	22
5.4	Relación entre <i>Polylepis rugulosa</i> y <i>Polylepis tarapacana</i>	22
6	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	24
7	REFERENCIAS	26
Anexo	1 Registro de estaciones meteorológicas utilizadas en este estudio.	

RESUMEN

Uno de los géneros de especies arbóreas más emblemáticos en los Andes es *Polylepis*, el cual se encuentra constituido por 28 especies. Su rango de distribución se ubica a lo largo de la Cordillera de los Andes entre los 9°N y 32° S, y entre los 1.800 y 5.200 m s.n.m. representando los bosques que se desarrollan a mayor altura en el mundo. Los bosques de *Polylepis* son considerados como uno de los ecosistemas de alta montaña más amenazados del mundo. Actualmente este género de especies arbóreas se encuentra sometido a una constante presión antrópica, y se desconoce los efectos de la actual variabilidad climática sobre su dinámica. Estos ecosistemas de altura cumplen un rol fundamental dentro de la ecología andina, siendo una fuente única de bienes y servicios ecosistémicos. En Chile se ubican dos especies de este género *Polylepis rugulosa* y *Polylepis tarapacana*, ambas situadas en el extremo norte de nuestro país. En la región de Arica y Parinacota de los Andes Atacameños del Altiplano chileno se ubica *Polylepis rugulosa* entre los 3.400 - 4.100 m s.n.m., especie sobre la cual existe muy poca información acerca de su biología y estado de conservación por lo que es necesario el desarrollo de estudios que determinen parámetros desconocidos sobre su dinámica. Con este fin y mediante la utilización de técnicas dendrocronológicas, en el presente trabajo se determinó la longevidad de la especie, tasas de crecimiento radial, relaciones entre la variabilidad interanual de precipitaciones y el crecimiento radial, y se analizó la relación del crecimiento entre *Polylepis rugulosa* y *Polylepis tarapacana* durante el último par de siglos.

De un total de 96 series de ancho de anillos de *Polylepis rugulosa* estudiadas, 79% fueron cofechadas exitosamente. La edad máxima de los individuos de *Polylepis rugulosa* colectados alcanzó a los 2 siglos, y se colectaron muestras de árboles con data de muerte de más de 170 años. El crecimiento radial promedio de *Polylepis rugulosa* es de 0,708 mm/año, y la cronología de crecimiento se extiende por 281 años (AD 1728 - 2009). La comparación a escala multidecadal entre la cronología de crecimiento de *Polylepis rugulosa* y los registros andinos de precipitación indican una relación positiva, sugiriendo que el crecimiento de la especie en la población de estudio estaría al menos parcialmente controlado por la disponibilidad hídrica durante el monzón de verano (Diciembre-Marzo). Sin embargo la comparación del crecimiento de *Polylepis rugulosa* a una escala multicentennial con un proxy regional de precipitación determinado por el crecimiento de *Polylepis tarapacana*, indica que sólo a partir de la segunda mitad del sXX se han observado relaciones positivas entre ambas variables. Esto coincide con que durante este último período las precipitaciones regionales han alcanzado los menores niveles dentro de los últimos 700 años. Esto sugiere que bajo el actual escenario de disminución de precipitaciones y aumento de temperatura, la disponibilidad hídrica estaría jugando un

mayor rol sobre el crecimiento de *Polylepis rugulosa* en estos bosques semiáridos de alta montaña. Estos resultados representan la primera información acerca de las tasas de crecimiento, longevidad, y relaciones entre el clima y el crecimiento de *Polylepis rugulosa*, contribuyendo de esta forma con información clave para futuros planes de conservación. El lento crecimiento de los individuos de *Polylepis rugulosa*, el actual escenario de variabilidad climática y presión antrópica, y las proyecciones futuras de las precipitaciones regionales, indican la necesidad de realizar mayores estudios sobre la biología de la especie y el desarrollo activo de estrategias adecuadas de manejo y restauración.

Palabras claves: Bosques de *Polylepis rugulosa*, dendrocronología, ecosistemas alta montaña, crecimiento arbóreo, variabilidad climática.

SUMMARY

One of the most emblematic genus of tree species from the Andes is *Polylepis*, which is conformed by 28 species. Its distributional range is located along the Andes Cordillera between 9°N - 32° S, and 1.800 - 5.200 m a.s.l., representing the world's highest elevation forest. The *Polylepis* forests are considered one of the most threatened mountain ecosystems in the world. Today, the species of this genus are under a constant human pressure, and the effects of present climate variability over its dynamics are unknown. These high elevation ecosystems play a fundamental role on the Andean ecology being a unique source of ecosystem goods and services. Two species of *Polylepis* are located in *Polylepis rugulosa* and *Polylepis tarapacana*, both in the northern extreme of our country. In Chile, *Polylepis rugulosa* forests are located in the Arica - Parinacota district in the Chilean Altiplano between 3.400 - 4.100 m a.s.l., and almost there are no information about its ecology and conservation status being critically the development of scientific studies that determine unknown parameters about its dynamics. With this purpose and utilizing dendrochronological techniques, in the present manuscript were determined the life-span of this species, annual growth-rate, the relations between tree-growth and precipitation, and the relation between the annual growth of *Polylepis rugulosa* and *Polylepis tarapacana* during the last two centuries.

From a total of 96 analyzed tree-ring series, 79% were successfully cross-dated. The maximum age reached almost 200 years and also we collected dead wood with more than 170 years. The mean radial growth of *Polylepis rugulosa* is 0,708 mm/year and the tree-ring chronology 281 years long (AD 1728 - 2009). At multidecadal time-scale the comparison between this chronology and the regional precipitation registries indicate a positive relation, suggesting that tree-growth would be at least partially controlled by water availability during the summer monsoon (December-March). However, the comparison at multicentennial time-scale of *Polylepis rugulosa* and a regional precipitation proxy given by a chronology of *Polylepis tarapacana* indicates that only since the second half of the XX century exists a positive relation between these two variables. This last coincides that the XX century has been the driest since 1300 AD as recorded by a precipitation reconstruction. These suggest that under the present scenario of decreasing precipitation and increasing temperatures over the Central Andes, water availability would be playing a role over *Polylepis rugulosa* growth on this arid environment. This results represent the first information about annual growth, life-span, and climate growth relationships in *Polylepis rugulosa*, thus contributing with key information for future conservation strategies. The low growth rates of the species, the present scenario of climate variability

and human pressure, and the future projections of regional precipitation, indicates the need of studies about the ecology of this species and an active development of conservation and restoration strategies.

Keywords: *Polylepis rugulosa* forests, tree-rings, mountain ecosystems, tree-growth, climate variability.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el planeta se encuentra en un escenario de calentamiento global con un aumento de la temperatura global entre 0,3 y 0,6° C durante el último siglo (IPCC 2007). Las reconstrucciones climáticas en base archivos ambientales han demostrado que las anomalías en los regímenes de temperatura y precipitación observadas durante el último siglo en varias regiones del mundo, no tienen precedentes similares dentro de los últimos 1.000 años y se encuentran fuera del rango de la variabilidad natural del sistema climático (Villalba *et al.* 2009). Frente a este escenario, existe una creciente preocupación por los ecosistemas boscosos de alta montaña, los cuales son relevantes por los servicios ecosistémicos que otorgan.

Los bosques de montaña son extremadamente frágiles, y actualmente se encuentran amenazados tanto directa como indirectamente por causas de origen antrópico tales como; la sobreexplotación, la erosión, el fuego, el aumento de las fronteras agrícolas y los cambios en el clima (Korner *et al.* 2005). Estos ecosistemas de alta montaña poseen un bajo potencial de producción de madera, pero suministran a las poblaciones locales una variada gama de productos no madereros y servicios ambientales, los cuales bajo futuros escenarios de cambio climático podrían verse alterados (Christopher *et al.* 1999, FAO 1999, Tobón 2009).

Entre las funciones de estos ecosistemas se encuentran la captura de aguas lluvias y la estabilización del suelo, son refugio de biodiversidad y poseen altos niveles de endemismo, considerándose como uno de los *hotspots* más importantes de biodiversidad mundial (Brehm *et al.* 2008).

Uno de los géneros de especies arbóreas más emblemáticos de los Andes es *Polylepis*. Se extiende entre las elevaciones andinas de Venezuela (9 ° N) hasta los Andes de Córdoba (32 ° S). Este género está compuesto por 28 especies, en elevaciones que van desde los 1.800 m s.n.m. en Córdoba, Argentina hasta los más de 5.200 m s.n.m. en el Volcán Sajama, Bolivia (Simpson 1993, Braun 1997, Christie 2009). Este género fue descrito por primera vez en 1794 por Ruiz y Pavon (Hensen 2002), Pertenece a la tribu Sanguisorbeae de la familia Rosaceae, la cual se caracteriza por presentar polinización anemófila y por sus frutos secos (Kessler 2006). Por otro lado, este género al desarrollarse sobre un clima árido dominante, permite que la madera muerta se mantenga en el suelo durante siglos, sirviendo como registros fósiles para la construcción de cronologías de ancho de anillos.

Las condiciones abióticas en las cuales se desarrollan las especies de *Polylepis* son rigurosas, con humedad relativa baja, alta radiación solar, y varias especies que se desarrollan en condiciones de semiaridez. Además, los suelos en los que se desarrollan son rocosos, se encuentran pobremente desarrollados y presentan una escasa disponibilidad de nutrientes (Marquet *et al.* 1998, Muñoz 2006).

Desde tiempos precolombinos, los bosques de *Polylepis* han sido utilizados por el hombre como fuente de recursos, principalmente con fines de construcción y fuego. Cumplen un rol central en la ecología altoandina, ya que son hábitat de muchas especies de plantas y animales y albergan un alto grado de endemismo tanto animal como vegetal (Yallico 1992, Kessler 2006). Hoy en día los bosques de *Polylepis* están considerados como uno de los ecosistemas de alta montaña más amenazados del mundo y de alta prioridad de conservación (Fjeldsa y Kessler 1996, Hjarsen 1997, Purcell *et al.* 2004). A pesar de la importancia de conocer la biología de las especies de *Polylepis* para diseñar futuros planes de manejo y conservación, existen especies para las cuales no existe ningún tipo de información acerca de su biología en términos de su longevidad y las relaciones entre sus patrones de crecimiento y la variabilidad climática a una escala secular (Gareca *et al.* 2010).

En Chile se encuentran solo dos especies del género *Polylepis*, *Polylepis tarapacana* y *Polylepis rugulosa*. Estas presentan requerimientos específicos de hábitat, localizándose exclusivamente en el Altiplano y las sierras de Parinacota, respectivamente. *Polylepis tarapacana* se desarrolla en la meseta del Altiplano sudamericano entre los 4.000 y 5.200 m de altitud a lo largo de la cordillera occidental desde el sur de Perú, Chile, Bolivia y el noroeste de Argentina (Soliz *et al.* 2009). *Polylepis rugulosa*, se localiza en el margen occidental del Altiplano, en Arequipa en el suroeste de Perú y en el norte de Chile (Brako *et al.* 1993, Schmidt-Lebuhn *et al.* 2006). Con una distribución muy restringida en Chile, no superando los 225,9 km² de extensión. Sus poblaciones se desarrollan entre los 3.400 y 4.100 m s.n.m. (Schmidt-Lebuhn *et al.* 2006), bajo un clima caracterizado con una menor estacionalidad de temperaturas, pero una marcada estacionalidad en las precipitaciones, con inviernos secos y veranos fríos-húmedos (Garreaud *et al.* 2003). En Chile su distribución está restringida a la sierra Andina de Chapiquiña y Zapahuira en la Región de Arica y Parinacota, y se encuentra catalogada como en peligro de extinción de acuerdo al D.S. N° 51 MINAGRI en Junio del año 2008.

Frente al actual escenario de presión antrópica, disminución de precipitaciones (Morales *et al.* 2011) y aumento de temperatura en los Andes Centrales (Vuille *et al.* 2000), es necesario realizar estudios acerca de la respuesta de los bosques de *Polylepis rugulosa* frente a estos cambios con el fin de entender su dinámica y evaluar la persistencia de estos ecosistemas de alta montaña.

En este contexto, el presente estudio consiste en levantar información sobre *Polylepis rugulosa* en bosques ubicados en su límite de distribución altitudinal, con el fin de brindar información base para el diseño de estrategias de conservación de este tipo de ecosistemas andinos. Como objetivo general se establece, determinar los patrones de crecimiento de *Polylepis rugulosa* y sus relaciones con la variabilidad climática a una escala secular. Para esto se plantea responder los siguientes objetivos específicos:

- I. Determinar las tasas de crecimiento y edades máximas que puede alcanzar *Polylepis rugulosa*.
- II. Explorar el potencial dendrocronológico de la especie evaluando la señal común del crecimiento entre árboles y la posibilidad de fechar individuos muertos.
- III. Evaluar la relación entre el crecimiento y la variabilidad temporal del clima regional.
- IV. Determinar los patrones de crecimiento multicentenarios de la especie.
- V. Comparar si *Polylepis rugulosa* presenta un patrón de crecimiento común al que exhibe *Polylepis tarapacana* a través del Altiplano.

2. ESTADO DEL ARTE

2.1 Relevancia ecológica de *Polylepis rugulosa*

Los bosques de *Polylepis rugulosa* poseen un gran valor biológico y cultural, controlan la erosión en las laderas andinas, son hábitat de numerosas especies vegetales y animales, y por siglos han servido como fuente de leña, carbón y madera para las culturas precolombinas (Yallico 1992, Fjeldsa y Kessler 1996, Espinoza 2001, Fernández *et al.* 2001, Lazcano y Espinoza 2001, Gareca *et al.* 2010). En los ecosistemas que constituye *Polylepis rugulosa* representan el hábitat de especies animales que se encuentran en peligro de extinción como la taruca o ciervo andino (*Hippocamelus antisensis*) (Sielfeld *et al.* 1988, 1999), y otras de importancia como el guanaco (*Lama guanicoe*), y el quirquincho de la Puna (*Chaetophractus nationi*). Se han avistado más de 23 especies de aves. Entre ellas se pueden destacar el Comesebo chico (*Conirostrum cinereum*), el Comesebo negro (*Diglossa brunneiventris*), el Picaflor azul (*Colibri coruscans*), el Naranjero (*Thraupis bonariensis*), el Zorzal negro (*Turdus chiguanco*), el Canastero del norte (*Asthenes dorbigny*), y la perdiz de la Puna (*Tinamotis pentlandii*), las cuales serían endémicas de este tipo de ecosistemas por lo que la persistencia de este tipo de bosques podría incidir directamente sobre potenciales extinciones locales de estas especies (Cofré 2007).

2.2 Avances dendrocronológicos para el género *Polylepis*

Los anillos de crecimiento han sido utilizados como registros ambientales sirviendo a la dendrocronología para reconstruir eventos pasados y determinar cómo las especies arbóreas se han desempeñado frente a la variabilidad climática del pasado. Estos “archivos ambientales” podrían contener información acerca de las relaciones entre el crecimiento y mortalidad de las especies arbóreas con la variabilidad climática. Los estudios dendrocronológicos en las regiones tropicales de Sudamérica son relativamente escasos, principalmente por la escasa capacidad de la mayoría de las especies arbóreas de estas regiones para formar anillos de crecimiento anuales, producto de la baja estacionalidad climática característica (Boninsegna y Villalba 1996, Villalba 2000, Boninsegna *et al.* 2009). Sin embargo durante los últimos años se ha comenzado a explorar con éxito, las propiedades dendrocronológicas de algunas especies del género *Polylepis* que se desarrollan en ambientes semiáridos de altura en los Andes centrales, donde la temperatura y la precipitación presentan una alta

variabilidad tanto intra como interanual. Producto de estas fluctuaciones, se ha comprobado el desarrollo de anillos de crecimiento anuales en algunas especies como *Polylepis tarapacana* (Argollo *et al.* 2004, Morales *et al.* 2004, Christie *et al.* 2009, Solíz *et al.* 2009), *Polylepis besseri* (Gareca *et al.* 2010) y *Polylepis pepeï* (Roig *et al.* 2001).

En el caso de *Polylepis tarapacana* la cual se desarrolla sobre los 4.000 m s.n.m. en la región del Altiplano, Argollo *et al.* (2004) señala que la temporada de lluvias de Diciembre a Marzo que coincide con la época de mayor temperatura, determina las condiciones ambientales para la activación del cambium y el desarrollo de los anillos anuales de crecimiento. Durante los últimos años se ha desarrollado una red de cronologías de crecimiento anual para esta especie con el fin de realizar reconstrucciones climáticas. Esta exploración se ha efectuado de forma exitosa en el Altiplano, contándose en la actualidad con más de 14 cronologías con una extensión de entre 110 y 705 años, las cuales están ubicadas entre los 4.000 y 4.900 m s.n.m. y constituyen los registros dendrocronológicos a mayor altitud en todo el mundo (Solíz *et al.* 2009, Christie *et al.* 2009). Argollo *et al.* (2004) y Solíz *et al.* (2009), sugieren que el crecimiento de *Polylepis tarapacana* depende en gran medida del balance de agua durante la temporada anterior al crecimiento radial, el cual se ve favorecido por anomalías positivas en las precipitaciones de verano. En cambio elevadas temperaturas de verano aumentarían la evapotranspiración, resultando en una reducción del crecimiento (Argollo *et al.* 2004). Uno de los mayores logros que se ha realizado con esta especie ha sido el reciente desarrollo de una reconstrucción de las precipitaciones del Altiplano para los últimos 700 años, la cual demuestra que la baja cantidad de lluvias durante el último siglo no tiene precedentes al menos desde el año 1.300 (Morales *et al.* 2011).

Para el caso de *Polylepis besseri*, Gareca *et al.* (2010) realizó estudios en la región alto andina de Bolivia, con el fin de investigar los efectos de factores naturales y antrópicos sobre el crecimiento y estructura de sus bosques. Los autores determinaron una edad máxima de 63 años para la especie, y desarrollaron dos cronologías de crecimiento con las cuales determinaron que el crecimiento radial es favorecido por anomalías positivas de las temperaturas.

Finalmente Roig *et al.* (2001) desarrollaron una cronología de anchos de anillos para *Polylepis pepeï*, a 4.100 m s.n.m. en ambientes húmedos de la Cordillera de Cochabamba, Bolivia. La extensión temporal de la cronología es de 135 años, y mediante análisis de correlaciones, se estableció que la temperatura de verano es el parámetro climático más fuertemente asociado al crecimiento con una relación significativamente positiva.

Hacia el margen occidental del Altiplano, en los Andes de Arica y Parinacota se ubican pequeños bosques de *Polylepis rugulosa* en un ambiente semiárido en la transición hacia el desierto de Atacama.

Este ambiente presenta fuertes fluctuaciones en la variación estacional de las precipitaciones lo que sumado a la gran variabilidad interanual de las mismas, posibilitaría la formación de anillos de crecimiento anuales. Por otro lado justamente esta región presenta hoy en día condiciones de aridez sin precedentes dentro de los últimos 700 años, y los modelos de predicción climática proyectan una reducción significativa de las lluvias y aumento de la temperatura, lo cual tendría profundos efectos sobre los recursos hídricos y la biota regional (Bradley *et al.* 2006, Minvielle y Garreaud 2011, Morales *et al.* 2011).

3. MATERIAL Y MÉTODOS

3.1 Área de estudio

Los bosques de *Polylepis rugulosa* estudiados, se localizan en la cuesta de Chapiquiña ubicada en los Andes de Arica y Parinacota, a 16 km del poblado de Putre a los 18°19 S y 69°39 W, a una altitud de 4.183 m s.n.m. representando el límite de distribución altitudinal de la especie (Figura 1). El muestreo fue realizado durante el mes de Abril del año 2011.

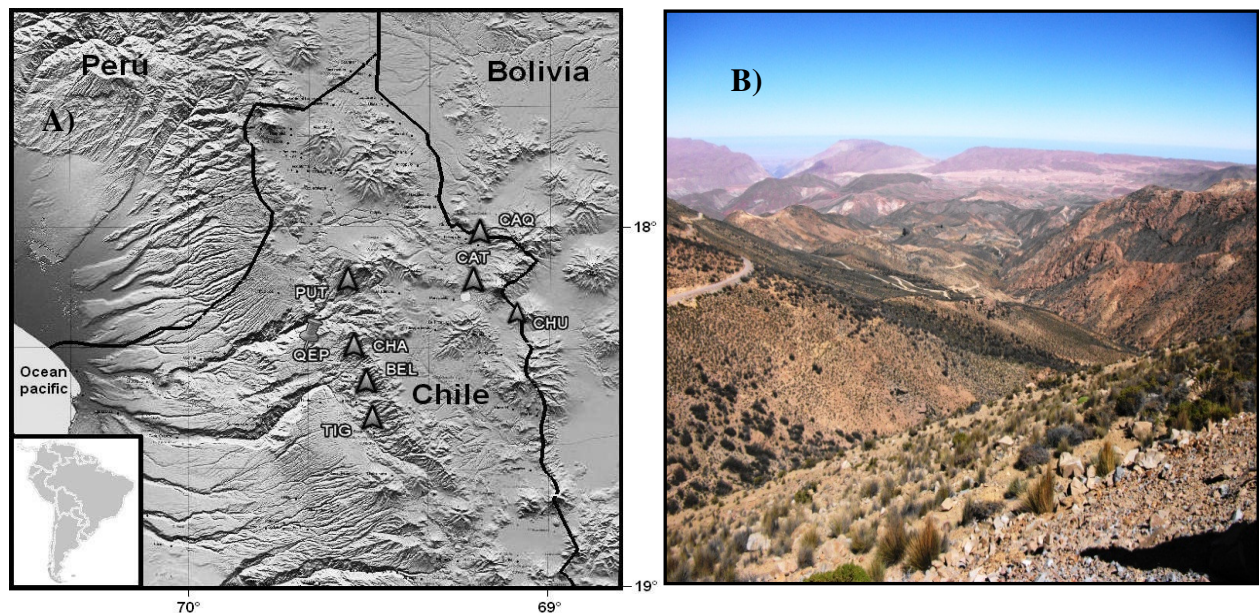


Figura 1. Imagen de elevación desde la costa de Atacama hasta el Altiplano sudamericano, indicando la ubicación de sitio de estudio (QEP), en triángulos las estaciones de precipitación utilizadas en este trabajo (A). Fotografía del sitio de estudio en el límite de distribución altitudinal de *Polylepis rugulosa* (B).

Según Serra *et al.* (1986), los bosques de *Polylepis rugulosa* se asocian con *Fabiana densa* y *Chuquiraga rotundifolia*. En observaciones efectuadas en el sitio de estudio, se observó que la especie presenta escasa vegetación acompañante, logrando reconocer a especies como *Chuquiraga spinosa* (Asteraceae) y *Cumulopuntia boliviana* (Cactaceae) conformando un matorral que no supera los 80 cm de altura. Los individuos de *Polylepis rugulosa* poseen una altura de entre 2 a 4 m (Figura 2), con una abundancia relativa no superior al 40% (Muñoz *et al.* 2006).



Figura 2. Individuo centenario de *Polylepis rugulosa* creciendo a los 4.180 m s.n.m. en el xérico ambiente de la transición entre el desierto de Atacama y el Altiplano de los Andes Centrales. En la sección inferior derecha, hojas y tronco de *Polylepis rugulosa*.

El sitio de estudio se ubica en una zona de desierto marginal de altura con una tendencia tropical, pues más del 80% de las escasas precipitaciones ocurren durante la estación de verano (Di Castri y Hajek 1976). El mes más lluvioso es Enero con un promedio de 62,42 mm y el más seco es Mayo con 0,26 mm. Con relación a las temperaturas promedio, estas fluctúan entre los -3,08 °C para el mes de Julio y los 19,75 °C para Noviembre (Figura 3). El diagrama climático, se realiza en base a la estación de Putre para temperatura, y para precipitación las estaciones de Chapiquiña, Belén, Putre y Tignamar.

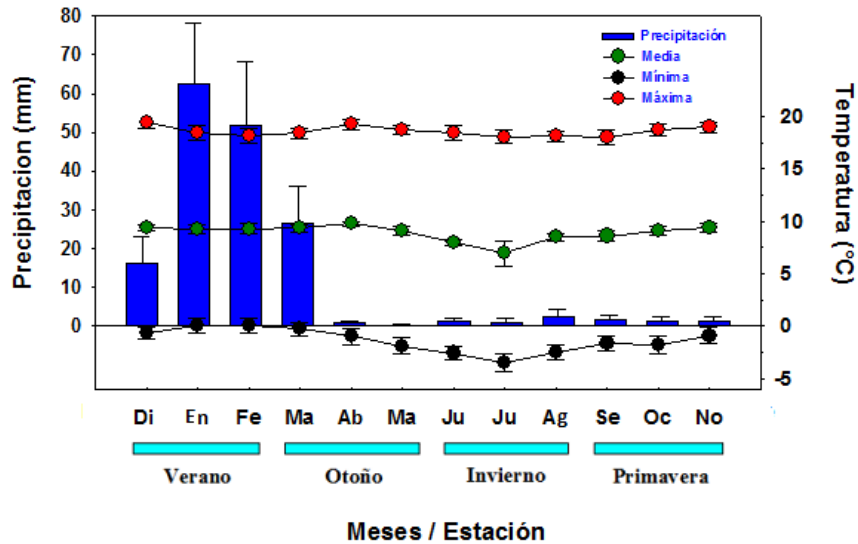


Figura 3. Diagrama climático del área de estudio, donde se muestra los valores mensuales medios de precipitación (mm), y de temperaturas mínima, media y máxima (°C). Las barras indican dos errores estándares (N = 32 y 38 años para precipitación y temperatura, respectivamente). Nótese que > 80% anual de las precipitaciones ocurren durante la estación de verano.

El tipo de suelo es de origen fluvio-glacial, con afloramientos rocosos, de poco desarrollo y bajo contenido de materia orgánica, con una profundidad superior a los 2 m, con un porcentaje de pedregosidad cercano al 40%. Acercándose a la descripción de Jaksic *et al.* (1997) donde determina que los suelos en el área altiplánica son formaciones volcánicas cuaternarias de relieve abrupto, en donde los tipos más representativos de suelos son los afloramientos rocosos, Litosoles y Regosoles, de muy débil desarrollo. Debido a sus características edáficas, la ausencia de condiciones climáticas que posibiliten una actividad orgánica adecuada resulta en suelos de escasa evolución y delgados (Muñoz *et al.* 2006). En las zonas aledañas al área de estudio se observa restos de antiguas actividades agrícolas en forma de terrazas de cultivo ubicadas en laderas.

En relación a la ocupación de las áreas aledañas, se observa utilización de laderas para cultivo, denotándose un uso muy intensivo en tiempos pasados remotos, mostrando como resultado una fuerte erosión de los suelos. Se aprecian siembras en desuso y unas pocas cultivadas, las que muestran las evidencias de la interacción con animales silvestres, al ser recubiertas en sus perímetros con elementos plásticos que tienen el fin de reducir la intromisión de guanacos y tarucas (RM-C Arquitectos 2006).

3.2 Desarrollo de la cronología de ancho de anillos

3.2.1 Obtención de las muestras

El muestreo de los individuos de *Polylepis rugulosa* fue selectivo, enfocado en la búsqueda de los más longevos en función de características físicas como su diámetro. Con el fin de evaluar el potencial de fechado de individuos muertos también se colectaron muestras de madera subfósil. Con la ayuda de una motosierra se extrajo una rodela o muestra transversal desde una de las ramas de los individuos vivos y de los individuos muertos en pie o restos de madera muerta sobre el suelo. Las muestras se identificaron con un código QEP seguido por un número y una letra A o B, de acuerdo a si era una sola (A) o dos por árbol (B).

3.2.2 Procesamiento de las muestras

Las muestras fueron preparadas siguiendo las técnicas dendrocronológicas descritas por Stokes y Smiley (1968) utilizando lijas de granulometría ascendente (150 a 2.000 granos/cm²). Posteriormente con la ayuda de una lupa estereoscópica se realizó el reconocimiento de la anatomía de la madera e identificación de los anillos de crecimiento anuales, observando la porosidad semicircular y las diferencias en el diámetro de las células de la madera temprana y tardía (Figura 4).

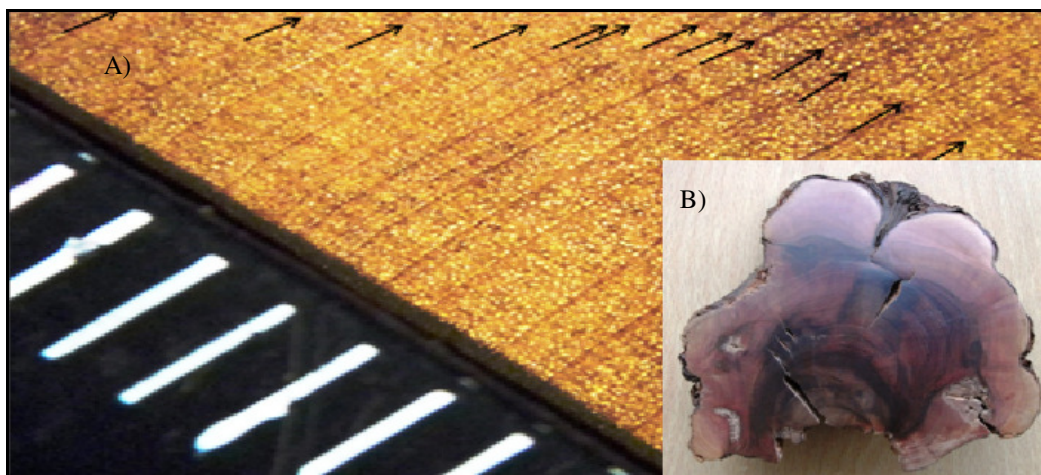


Figura 4. Corte transversal de la madera de *Polylepis rugulosa* donde se indican los anillos de crecimiento anuales (flechas negras). Las líneas blancas corresponden a una referencia donde el espacio entre ellas corresponde a 1mm (A). Muestra de *Polylepis rugulosa* indicando el patrón excéntrico de crecimiento (B).

Luego de reconocer e identificar los anillos de crecimiento, se fechó cada muestra o serie siguiendo la convención Schulman (1956) para el Hemisferio sur, donde se establece que la fecha de cada anillo corresponde al año en que comenzó a formarse dado que la temporada de crecimiento abarcaría desde Noviembre de un año x , hasta Marzo de un año $x+1$. Las muestras fueron recolectadas en abril del año 2011, por lo cual el último anillo de crecimiento completo fue el año 2009. Una vez asignada la fecha al anillo más externo (cercano a la corteza), se realizó el fechado hasta llegar al anillo más interno de cada muestra. En cada muestra se marcó cada década con un punto, cada mitad de siglo con dos puntos y cada siglo con tres puntos (Stokes y Smiley 1968).

Posteriormente a través de un dendrómetro Velmex conectado a un computador, se midió el ancho de los anillos de cada serie con una precisión de 0,001 mm dando como resultados dos series temporales por cada rodela. Estos datos se utilizan en el programa computacional COFECHA, el cual calcula los coeficientes de correlación entre las series individuales de anillos de árboles, permitiendo la identificación de los anillos ausentes o falsos (Holmes 1983), y una revisión y evaluación de la fidelidad de los resultados, a partir de la utilización de ventanas de 30 años con una superposición de 15 años. A las muestras subfósiles, se les asignó un año de comienzo del crecimiento, comparando la serie individual con una serie maestra compuesta por el resto de las muestras.

3.3 Construcción de la cronología de ancho de anillos

La construcción de la cronología de *Polylepis rugulosa*, se realizó utilizando el programa ARSTAN, este programa, elimina las tendencias biológicas propias del crecimiento y minimiza las variaciones en el crecimiento que no son comunes a todos los árboles (Cook y Holmes 1986).

Se realizaron estandarizaciones, consistentes en ajustar a cada serie de crecimiento individual una curva exponencial negativa, línea recta o curva flexible (spline), con el fin de homogeneizar la varianza y remover los efectos del cambio de la tasa de crecimiento del árbol debido al aumento de la edad (Cook y Holmes 1986). Las cronologías utilizadas en el análisis fueron la versión estándar y residual. La versión estándar preserva la señal de baja frecuencia, mientras que la cronología residual conserva la señal de alta frecuencia contenida en las series de ancho de anillos. En este último caso se remueve la autocorrelación presente en las series de ancho de anillos, lo cual permite determinar el correcto nivel de significancia en los análisis de correlación. Para comprobar la calidad de la cronología se utilizó el estadístico de la Señal Expresada de la Población (EPS), la cual es una medida de la robustez de la señal común entre las diferentes series de una cronología (Wigley *et al.* 1984). Según Briffa (1995),

cuando los valores de EPS están próximos o son mayores a un valor de 0,85, el número de muestras que integra una cronología es adecuado o está captando un porcentaje óptimo de la señal teórica que resulta de una replicación infinita de las muestras. Valores menores de 0,85 estarían indicando que la replicación en ese sector de la cronología es baja y que debería aumentarse el número de muestras para fortalecer la señal. Para el cálculo de la EPS se utiliza una ventana de 30 años con una superposición de 15 años entre las ventanas adyacentes.

3.4 Crecimiento radial Acumulado

Las curvas de crecimiento radial acumulado permiten apreciar la evolución del árbol a lo largo de su vida y acusan las perturbaciones positivas o negativas a que ha sido sometido (Gutiérrez 1988).

La medida del ancho de los últimos anillos es un método utilizado para hacer estimaciones de producción (Ferrés 1985), por lo que se calcularon las tasas de crecimiento radial acumulado para cada uno de los individuos colectados. Teniendo en cuenta la importancia de estimar el crecimiento radial acumulado, se calculó a partir de los datos obtenidos de la medición de cada serie. Se consideró el supuesto de que todos los árboles cuentan con el primer año de crecimiento en sus radios. Los radios fueron obtenidos a una altura promedio de 40 cm.

3.5 Relación entre el clima y el crecimiento radial

Con el fin de determinar los patrones de crecimiento radial de *Polylepis rugulosa* y sus relaciones con el clima regional, se desarrollaron funciones de correlación entre la cronología de ancho de anillos y series de precipitación y temperatura (Blasing *et al.* 1984). Para la precipitación, se elaboró un registro regional, a partir de las estaciones de Caquena, Cotacotani, Chungara, Putre, Belén, Tignamar y Chapiquiña, a partir de datos obtenidos de la Dirección General de Aguas (Anexo 1), y para la temperatura cuenta con datos obtenidos de la estación de Oruro. Estos análisis fueron elaborados sobre el período común entre la cronología y los datos instrumentales. Debido a que el ancho de un anillo anual es la integración de los procesos de influencia climática ocurridos sobre un extenso período que puede llegar a abarcar incluso el año previo (Fritts 1976). Se evaluó un periodo de 24 meses para determinar si existe una relación entre la influencia climática del año previo, en la formación de anillos de crecimiento de la estación actual. Al integrar los 24 meses, se considera las condiciones climáticas durante dos estaciones de crecimiento completas.

3.6 Relaciones entre el crecimiento de *Polylepis rugulosa* y *Polylepis tarapacana*

Con el propósito de explorar la existencia de similitudes entre los patrones de crecimiento de *Polylepis rugulosa* y los de *Polylepis tarapacana*, se efectuaron correlaciones entre ambas cronologías, a partir de ventanas móviles de 30 años. Este análisis fue desarrollado en un período de tiempo común para ambas especies de *Polylepis* (1728-2009). La cronología de *Polylepis tarapacana* utilizada representa el patrón de crecimiento regional de la especie desarrollado por Morales *et al.* (2011).

4. RESULTADOS

4.1 Cronología de ancho de anillos

A partir de las muestras obtenidas en el sitio Chapiquiña, se logró cofechar un 79% de las 96 muestras colectadas, obteniéndose una cronología de ancho de anillos *Polylepis rugulosa* con una extensión de 281 años (1728-2009). Esto demuestra que los individuos muestreados, presentan una alta coherencia temporal en sus patrones de crecimiento (Cuadro 1).

Cuadro 1. Estadísticos para la cronología de ancho de anillos de *Polylepis rugulosa* a partir de los valores obtenidos del programa ARSTAN.

Estadísticos	Chapiquiña	
Número de series	76	
Número de árboles	36	
Correlación entre series	0,356 (P<0,01)	
Sensibilidad media	0,435	
Edad media/ máxima (años)	102 ± 198	
Crecimiento promedio anual (mm) /desviación estándar	0,708 ± 0,226	
Estadísticos	Cronología Estándar	Cronología Residual
Desviación estándar	0,233	0,197
EPS	0,848	0,841
R-BAR	0,206	0,197

La cronología está compuesta por 76 series de ancho de anillos correspondiente a 36 árboles. Con respecto al número de series por año, la cronología comienza en el año 1728 con 2 series, aumenta a 10 en 1750, posee un máximo de 42 series en 1851, y llega hacia el término de la cronología en el año 2009 con 16 series. Esto permite tener confiabilidad en los resultados a partir del año 1750, ya que existen 10 radios provenientes de 5 árboles diferentes. En relación al periodo máximo de replicación éste se localiza entre 1850 y 1970 y presenta más de 36 radios (Figura 5).

Las series de la cronología cuentan con un promedio de 102 años, con rangos que van entre un mínimo de 30 y un máximo de 198 años. La serie más extensa de la cronología va desde 1737 a 1934 con 198 años, siendo de origen subfósil. La serie obtenida a partir de un árbol vivo más extensa, se distribuye entre 1842 al 2009 con 168 años (Figura 5). La coincidencia en los periodos de tiempo entre las series de individuos vivos y muertos permite una total credibilidad en la asignación de los años calendario.

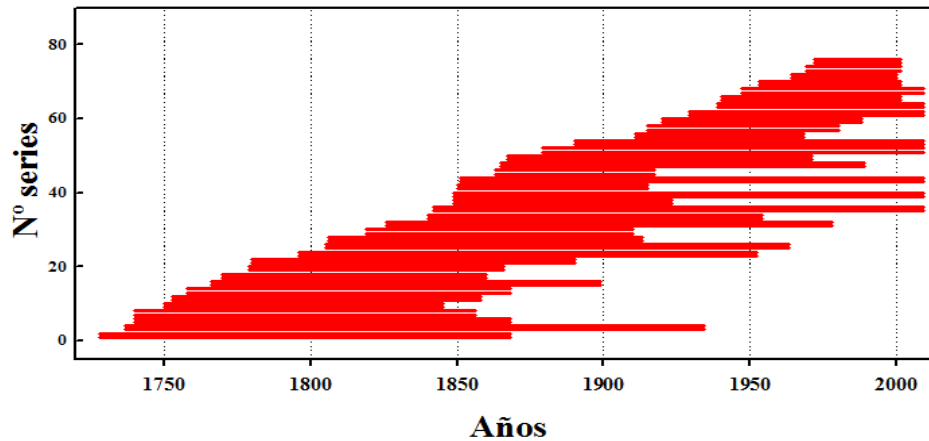


Figura 5. Distribución temporal de las 76 series cofechadas en la cronología de ancho de anillos de *Polylepis rugulosa*. Período completo entre 1728 al 2009 AD). Cada línea horizontal representa una serie.

4.2 Crecimiento radial

Se determinó el crecimiento radial acumulado para cada árbol, determinando que el crecimiento promedio anual promedio de todos los árboles es de 0,708 mm, esto calculado a partir de los datos de 7.780 anillos de crecimiento. La figura 6 muestra que en general un individuo requiere de 100 años de edad para alcanzar un crecimiento radial acumulado de 80 mm, lo cual demuestra una baja tasa de crecimiento para la especie.

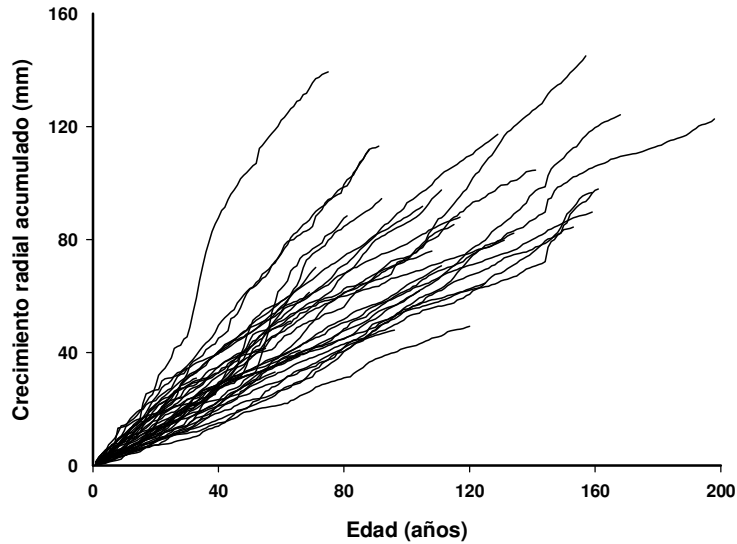


Figura 6. Crecimiento radial acumulado (milímetros por año) de individuos de *Polylepis rugulosa*.
Cada línea representa un árbol (N = 36).

4.3 Relación con variables climáticas

4.3.1 Funciones de correlación

La función de correlación muestra que el crecimiento radial de *Polylepis rugulosa*, se encuentra relacionado con las condiciones climáticas del verano. Se observa una relación positiva y significativa entre la cronología de crecimiento y la precipitación especialmente para los meses de Diciembre y Enero del periodo actual de crecimiento, coincidiendo con los meses de mayor precipitación para el área de estudio. Para Diciembre posee un coeficiente de correlación de 0,359 y para Enero de 0,373, dentro del período 1970 al 2007 ($P < 0.05$; $N = 38$) (Figura 7).

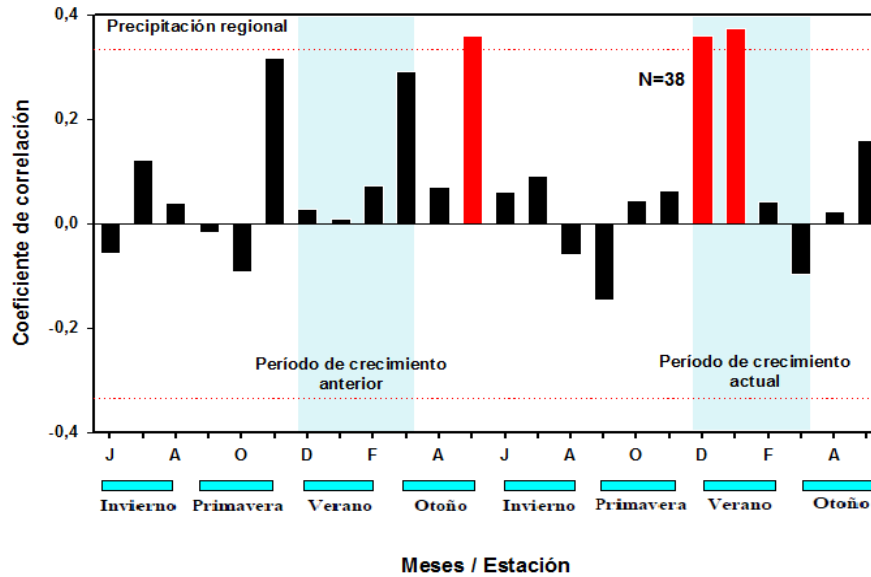


Figura 7. Funciones de correlaciones entre la cronología de ancho de anillos de *Polylepis rugulosa* y el registro mensual de las precipitaciones regionales. N= número de años utilizados en el análisis de correlación. Todas las correlaciones están realizadas sobre los valores pre-blanqueados de las series de tiempo. Las líneas discontinuas horizontales indican la significación estadística al 95%. Las barras de color celeste indican la temporada de crecimiento de *Polylepis rugulosa*.

En la figura 8 se presentan las anomalías estandarizadas o normalizadas de las series de tiempo y precipitación regional, a partir de la cronología residual y la mejor combinación de meses de precipitación (correspondiente a 11 meses, desde marzo del año anterior a enero del año actual). Se observa que ambas series de tiempo presentan similitudes en las tendencias, ya que el coeficiente de correlación entre ambas es de 0,57. Los años que presentan mayor y menor semejanza son los años 1999 y 1995 respectivamente.

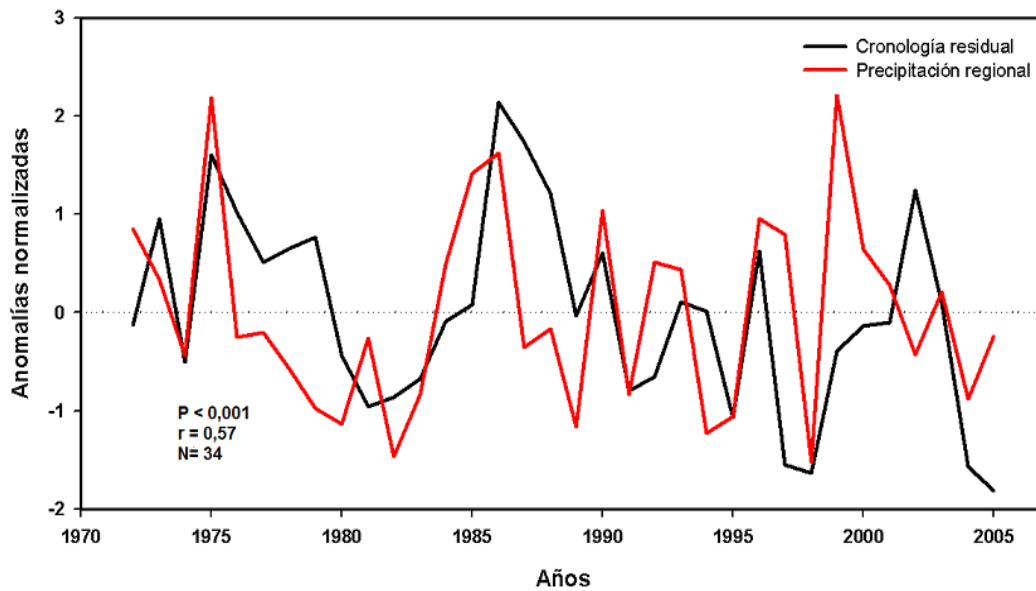


Figura 8. Comparación entre las anomalías normalizadas de la cronología (residual) de crecimiento radial de *Polylepis rugulosa* y la serie instrumental de las precipitaciones regionales (1970-2007 AD). La serie de tiempo de la precipitación representa el período de meses que logra la mejor correlación con el crecimiento arbóreo correspondiente a 11 meses, desde Marzo del año anterior a Enero del año actual. El valor de r indica el coeficiente de correlación entre la cronología y la precipitación, y N el número de años utilizados para el análisis.

En la figura 9 se muestran las cronologías de índice de ancho de anillos de *Polylepis rugulosa* en su versión estándar y residual. Para la mejor visualización de las ondas de baja frecuencia contenidas, también se presenta sobre ella una curva de spline cúbico que remueve el 50% de la varianza cada 20 y 10 años para la cronología estándar y residual, respectivamente. En la cronología estándar se puede observar varios periodos sucesivos de crecimiento sobre y bajo la media. El año 1986 posee el valor más alto de toda la cronología (1,867), y el valor más bajo es de (0,527) en 1806. Existe un periodo entre 1956 y 1972, donde todos los valores se encuentran bajo la media. Para la cronología residual, los años que poseen las mayores fluctuaciones son 1769 (1,548) y 1770 (0,463), con valores sobre y bajo la media respectivamente (Figura 9). Con respecto al valor del EPS, la cronología de *Polylepis rugulosa* presentó valores cercanos a 0,85, lo que indica la existencia de una fuerte señal común del crecimiento entre los árboles (Figura 9).

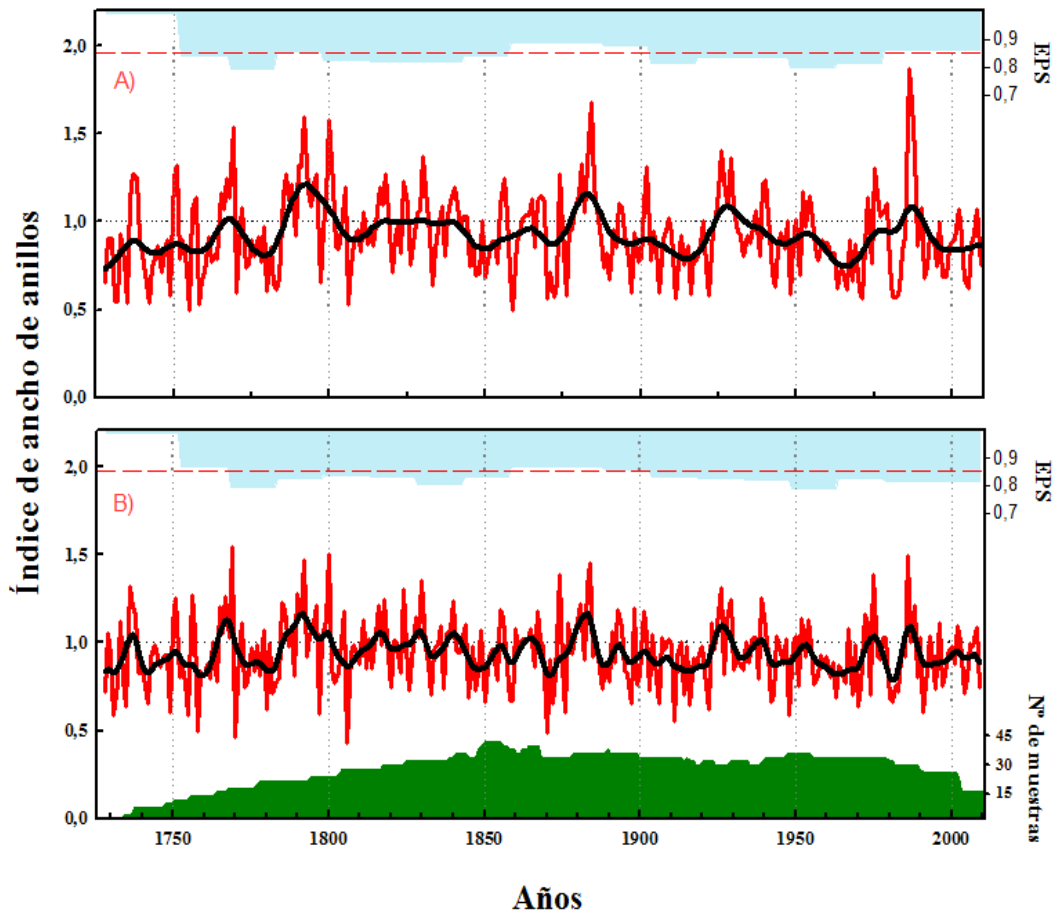


Figura 9. Cronologías estándar (A) y residual (B) de ancho de anillos de *Polylepis rugulosa*, y estadísticos respectivos. En color rojo se indican los valores anuales de los índices de ancho de anillos, en negro los índices suavizados con un spline cúbico de 20 y 10 años (estándar y residual, respectivamente). El sombreado celeste indica los valores de la Señal Expresada de la Población (EPS) lo cual indica la fortaleza de la señal común entre las muestras (se consideran como óptimos valores sobre 0,85), y el sombreado verde indican el número de muestras de anillos analizados por año.

4.4 Relación entre *Polylepis rugulosa* y *Polylepis tarapacana*

En la figura 10, se presentan las correlaciones móviles entre las cronologías de *Polylepis rugulosa* y *Polylepis tarapacana*, ambas especies presentes en los Andes de Arica y Parinacota pero en pisos altitudinales diferentes. Cabe destacar que estudios previos han demostrado que el crecimiento de *Polylepis tarapacana* se encuentra estrecha y positivamente relacionado con la cantidad de

precipitaciones de verano, por lo que se le considera un indicador de la cantidad de agua caída para la región del Altiplano (Solíz *et al.* 2009, Morales *et al.* 2011). A partir del análisis de correlación móvil se puede observar que dentro del período de tiempo analizado, sólo durante la segunda mitad del siglo XX se aprecian similitudes en el crecimiento de ambas especies indicadas por correlaciones positivas y significativas.

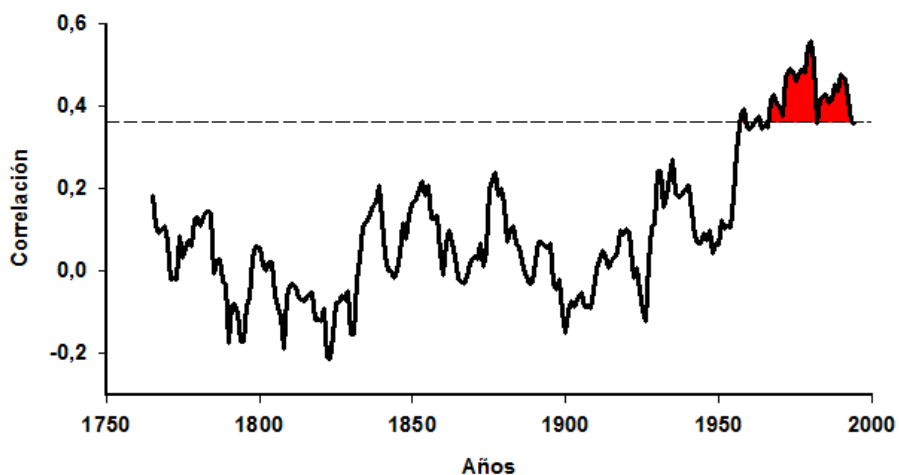


Figura 10. Correlaciones móviles de 30 años entre las cronologías de *Polylepis rugulosa* y *Polylepis tarapacana*, realizado con la cronología estándar, a partir de ventanas móviles de 30 años para el período común 1728 – 2009 AD. En rojo se observa el período de tiempo con valores significativos de relación positiva. La línea segmentada horizontal corresponde al valor de significancia al 95%.

5. DISCUSIÓN

5.1 Cofechado de muestras

El presente estudio representa la primera investigación dendrocronológica en *Polylepis rugulosa*. La anatomía de la madera de *Polylepis rugulosa* se caracterizó por presentar porosidad semicircular y límites relativamente visibles entre los anillos de crecimiento. De un total de 48 árboles, expresado en 96 muestras cofecharon 76 series (36 árboles), correspondientes a un 79% del total de las series, lo cual se puede considerar como un alto porcentaje. Las series proveniente de material subfósil se unían con una mayor correlación a la serie maestra, debido principalmente a que poseen una tonalidad más opaca, permitiendo mayor visibilidad de los anillos. La correlación existente entre las series es de 0,356 ($P < 0,01$), este valor al ser comparado con las correlaciones del cofechado de *Polylepis tarapacana* es bajo (Argollo *et al.* 2004, Soliz *et al.* 2009), pero para otros representantes del género se posiciona en forma similar como por ejemplo en *Polylepis besseri* (Gareca *et al.* 2010) y *Polylepis pepeí* (Roig *et al.* 2001). La señal expresada de la población (EPS) es cercana a 0,85 con un valor de 0,848, en todo el periodo de análisis, mostrando un nivel de fidelidad de la señal común entre los árboles. En relación a la edad máxima alcanzada por *Polylepis rugulosa*, esta fue de 198 años, siendo menor a la de *Polylepis tarapacana* (716 años, Morales *et al.* 2011), pero mayor que *Polylepis besseri* (63 años, Gareca *et al.* 2010) y *Polylepis pepeí* (132 años, Roig *et al.* 2001). En cuanto al tiempo máximo de persistencia de la madera muerta sobre el suelo, esta es superior a los 150 años, ya que se logró ingresar en el análisis una rodela con más de 164 años de data de muerte, en excelentes condiciones físicas. El material subfósil va adquiriendo una tonalidad de color café, permitiendo una mayor visualización de los anillos de crecimiento.

5.2 Tasas de crecimiento radial

Las curvas obtenidas de crecimiento radial acumulado muestran la linealidad en el desarrollo, sugiriendo que *Polylepis rugulosa* puede mantener las tasas de crecimiento constante por más de 198 años. La tasa de crecimiento promedio de la especie de 0,708 mm, lo que indicaría que los bosques de *Polylepis rugulosa* poseen una lenta tasa de productividad, pero al mismo tiempo, dado la alta persistencia en el suelo de la madera muerta y la edad que pueden alcanzar los individuos, la productividad de estos ecosistemas a una escala secular sería significativamente alta para las rigurosas

condiciones ambientales en las cuales se desarrolla. A modo de comparación, *Polylepis rugulosa* presenta valores de tasa de crecimiento similares que *Polylepis besseri*, menores que *Polylepis pepeii* (2.32/año), pero mayores que *Polylepis tarapacana* la cual alcanza sólo 0.47 mm/año (Roig *et al.* 2001, Gareca *et al.* 2010, Morales *et al.* 2011).

5.3 Relación con variables climáticas

El análisis de la cronología de ancho de anillos efectuada en este estudio demuestra que el crecimiento de *Polylepis rugulosa*, estaría regulado por las variaciones interanuales del clima en el Altiplano. Su crecimiento se ve modelado por las condiciones climáticas durante la estación de crecimiento actual, diferente a lo que sucede con *Polylepis tarapacana* (Argollo *et al.* 2004, Christie *et al.* 2009, Solíz *et al.* 2009), que se ve influenciado por las condiciones climáticas de la estación de crecimiento anterior. Principalmente el crecimiento de *Polylepis rugulosa* se ve moldeado por la precipitación regional, siendo favorecido con precipitaciones abundantes. Además presenta correlaciones positivas ($r= 0,57$) para 11 meses desde marzo del año anterior a enero del año actual (Figura 7). Esta relación se manifiesta en las funciones de correlación, con valores sobre el nivel de significancia estadística, para la estación de crecimiento actual correspondiente a los meses de diciembre y enero (Figura 6), debido a que concuerda con el periodo de mayor precipitación. En el altiplano sur, las lluvias de verano representan más del 90% de la precipitación anual total (Garreaud *et al.* 2003, Vuille y Keimig 2004). En cuanto a la temperatura, se observa una relación débil, no siendo significativa en ningún mes, esto puede deberse a que los registros de estaciones meteorológicas existentes son muy alejados, incompletos y de baja confiabilidad (datos a partir de la estación de Oruro), o simplemente que esta especie no se ve influenciada por la temperatura, a diferencia de otras especies. Macek *et al.* (2009) realizó un estudio acerca de los rangos morfológicos y ecofisiológicos de tres especies de *Polylepis* en un gradiente altitudinal, donde determina que el agua es un factor adicional importante en la distribución altitudinal de *Polylepis rugulosa*.

5.4 Relación entre *Polylepis rugulosa* y *Polylepis tarapacana*

En Chile, sólo existen dos representantes del género *Polylepis*, que poseen diferentes rangos de distribución altitudinal en los Andes centrales. A partir de *Polylepis tarapacana* se han desarrollado cronologías que han contribuido a desarrollar la primera reconstrucción de alta resolución de las

precipitaciones del Altiplano para los últimos 700 años (Morales *et al.* 2011). En cuanto a *Polylepis rugulosa* este es el primer estudio dendrocronológico en la especie. Para evaluar la existencia de un patrón de crecimiento similar entre estas dos *Polylepis*, se efectuaron correlaciones móviles entre ambas cronologías, a partir de un período de tiempo común (1728-2009), pudiendo observar que en los últimos 30 años existen similitudes en el crecimiento entre ambas especies, con correlaciones positivas y significativas, teniendo valores sobre el valor crítico observado (0,36). Estos patrones o similitudes en el crecimiento sólo se presentan en la segunda mitad del siglo XX. Esto indicaría que el crecimiento de los individuos de *Polylepis rugulosa* analizados no habría estado fuertemente limitado por las condiciones hídricas previamente, y sólo demuestra esta relación positiva en este período que es justamente cuando las precipitaciones del Altiplano han llegado a su nivel más bajo dentro de los últimos 700 años (Morales *et al.* 2011). Además cuatro de los siete años de sequías más extremas de los últimos años, se produjeron durante el período 1940 a 2006 (1940, 1982, 1994 y 2006, respectivamente). Eventualmente la disminución de la precipitación ha forzado que patrones de crecimiento diferentes, sean cada vez más similares, debido tal vez a nuevas estrategias adaptativas (morfológicas y ecofisiológicas) o evolutivas, que van en respuesta a cambios climáticos como la extrema condición de aridez expresada durante el último siglo. Este cambio en la respuesta del crecimiento de *Polylepis rugulosa* a la variabilidad climática indica que bajo el futuro escenario de disminución de precipitaciones, la productividad de estos bosques disminuiría y la persistencia de ellos podría estar en riesgo.

Se ha documentado por Macek *et al.* (2009) que *Polylepis rugulosa* al encontrarse en un nivel altitudinal menor que *Polylepis tarapacana* y la transición entre el Altiplano y el desierto de Atacama, obtiene una menor cantidad de precipitaciones provenientes desde el margen oriental del Altiplano. Por otro lado sería necesario realizar estudios comparativos complementarios acerca del tipo de suelo que alberga a ambas especies, y profundizar en la obtención de información ecofisiológica (tasas de evaporación, respiración y en especial sobre balance estomático) lo cual es clave para evaluar la persistencia de este tipo de ecosistemas bajo el actual escenario de cambio en la disponibilidad hídrica.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De la red de cronologías efectuadas para el género *Polylepis* en Sudamérica este estudio es el primero desarrollado para *Polylepis rugulosa*, otorgando información acerca de sus tasas de crecimiento, su longevidad, y la relación de su crecimiento con variables climáticas, entregando información clave para futuros planes de manejo, conservación y restauración.

Los patrones de crecimiento en base a la cronología de ancho de anillo para *Polylepis rugulosa* presentan una correlación positiva y significativa con las precipitaciones de registros instrumentales de verano, ya que en estos meses es donde se presenta la mayor cantidad de precipitación en el área de estudio. En cuanto a la temperatura no se encontraron respuestas significativas.

Polylepis rugulosa es una especie longeva que puede alcanzar al menos dos siglos de vida, su madera muerta presenta bajas tasas de descomposición, y aunque no presenta una excelente definición en los anillos anuales de crecimiento, con un trabajo meticuloso es posible desarrollar cronologías de ancho de anillos aptas para estudios dendrocronológicos. La cronología desarrollada en este trabajo contribuye a los esfuerzos por encontrar especies con potencial dendrocronológico en nuevas regiones de los Andes.

Durante los últimos 200 años *Polylepis rugulosa* ha presentado un patrón de crecimiento cambiante con respecto a *Polylepis tarapacana*, exhibiendo un modo sin relación durante los primeros 150 años y luego una relación coherente y positiva durante la segunda mitad del siglo XX. Esto último se atribuiría al significativo aumento de aridez que ha experimentado el Altiplano durante el último siglo. Este cambio en el patrón de crecimiento de *Polylepis rugulosa* con respecto a las precipitaciones, sería una respuesta a un nuevo escenario climático, como una estrategia adaptativa para persistir.

Este estudio se suma a los escasos conocimientos de *Polylepis rugulosa*, siendo necesario entender los mecanismos adaptativos y atributos funcionales que la especie ha desarrollado, con el fin de desarrollar futuros planes de manejo de este tipo de ecosistemas que puedan ser desarrollados a nivel local y regional. Actualmente es necesario llenar los vacíos de información biológica, como son la incorporación de estudios que analicen las características ecológicas, morfológicas y ecofisiológicas de la especie, así como los efectos de las perturbaciones naturales y antrópicas sobre la dinámica de los bosques de *Polylepis rugulosa*.

La conservación de estos ecosistemas es clave para mantener la biodiversidad de este tipo de ambientes alto andinos, y los servicios ecosistémicos que brindan la producción de agua que es la base para actividades económicas locales. La tarea prioritaria para la población local y los tomadores de

decisiones, es la valoración del rol que cumplen estos bosques en los ambientes semiáridos de alta montaña de los Andes centrales.

7. REFERENCIAS

- Argollo, M., Solíz, C., Villalba, R. 2004. Potencialidad dendrocronológica de *Polylepis tarapacana* en los Andes centrales de Bolivia. *Ecol. Boliv.* 39: 5–24.
- Blasing, T.J., Solomon, A.M., Duvick, D.N., 1984. Response functions revisited. *Tree-Ring. Bull.* 44: 1–15.
- Boninsegna, J.A. R. Villalba. 1996. Dendroclimatology in the southern hemisphere: review and prospect. En: J. S. Dean, D.M. Meko & T.W. Swetnam (Eds.). *Tree Rings, Environment and Humanity. Radiocarbon.* Tucson. pp. 127-141.
- Boninsegna, J.A., Argollo, J., Aravena, J.C., Barichivich, J., Christie, D.A., Ferrero, M.E., Lara, A., Le Quesne, C., Luckman, B.H., Masiokas, M., Morales, M.S., Oliveira, J.M., Roig, F., Srur, A., and Villalba, R. 2009. Dendroclimatological Reconstructions in South America: A review. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol.*, 281, 210- 228.
- Bradley, R.S., Vuille, M., Diaz, H.F., and Vergara, W. 2006. Threats to water supplies in the tropical Andes. *Science*, 312, 1755-1756.
- Brako L. y J.L. Zarucchi. 1993. Catalogue of the Flowering Plants and Gymnosperms of Peru. *Monographs in Systematic Botany. Missouri Botanical Garden*, 45: 1003-1010
- Braun, G., 1997. The use of digital methods in assessing forest patterns in an Andean environment: the *Polylepis* example. *Mt. Res. Dev.* 17, 253–262.
- Brehm, G., J. Homeier, K. Fiedler, I. Kottke, J. Illig, N.M. Nösk, F. Werner, S.-W. Breckle. 2008. Mountain Rain Forests in Southern Ecuador as a Hotspot of Biodiversity – Limited Knowledge and Diverging Patterns. In Beck, E., J. Bendix, I. Kottke, F. Mak, R. Mosa (Eds.). *Gradients in a Tropical Mountain Ecosystem of Ecuador. Analysis and Synthesis.* Ecological Studies, Vol. 198: 15-25.
- Briffa, K.R. 1995. Interpreting High-Resolution Proxy Climate Data – The Example of Dendroclimatology. In von Storch, H. A. Navarra (Eds.). *Analysis of Climate Variability, Applications of Statistical Techniques.* Springer, Berlin. pp: 77-94.
- Christie, D.A., Lara, A., Barichivich, J., Villalba, R., Morales, M.S., Cuq, E. 2009. El Niño southern Oscillation signal in the world's highest-elevation tree-ring chronologies from the Altiplano, Central Andes. *Palaeoclimatol., Palaeoecol.* 281: 309–319.
- Christopher, J., S. Prudence, N. Foster S. Schneider. 1999. Simulating the effects of climate change on tropical montane cloud forests. *Nature* 398: 306- 310.

- Cofré H. Avifauna asociada a los bosques de queñoa (*Polylepis* spp.) del Norte de Chile. Boletín Chileno de Ornitología 13: 56-60.
- Cook, E. R. R.L Holmes. 1986. Users manual for program ARSTAN. Chronology Series VI, University of Arizona. 32 p.
- Di Castri, F. E.R. Hajek. 1976. Bioclimatología de Chile. Editorial de la Universidad Católica de Chile, Santiago. 129 p.
- Espinoza D. 2001. Estrategias en el manejo de los recursos naturales, en producción y reproducción agropecuaria (Comunidad Kewhuiñapampa). Dissertation for Licenciado en Economía. Universidad Mayor de San Simón. Bolivia.
- FAO. 1999. Parte I: situación y perspectivas de la conservación y desarrollo de los bosques. Situación de los bosques del mundo 1999: FAO, Roma, Italia. 47 p.
- Fernández M., Mercado M., Arrázola S., y Martínez E. 2001. Structure and floral composition of one forest fragment of *Polylepis besseri* Hieron subsp *besseri* in Sacha Loma (Cochabamba). Rev. Bolivia. Ecol. 9: 15– 27.
- Ferrés, Ll. 1985. Creixement radial i producció primhria neta abria a l'alzinar de la Castanya (Montseny, Barcelona). Orsis. 1:71-79.
- Fjeldsa, J. M. Kessler. 1996. Conserving the biological diversity of *Polylepis* Woodlands of the highland of Perú and Bolivia. NORDECO. Denmark. 250 p.
- Fritts, H.C. 1976. Tree Rings and Climate. Academic Press, London.
- Gareca E., Fernández M. Stanton S. 2010. Dendrochronological investigation of the high Andean tree species *Polylepis besseri* and implications for management and conservation. Biodivers Conserv 19:1839–1851.
- Garreaud, R., Vuille, M., Clement, C.A. 2003. The climate of the Altiplano: observed current conditions and mechanism of past changes. Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol. 194, 5–22.
- Gutiérrez E., 1988. Dendroecological study of *Fagus sylvatica* L. in the Montseny mountains (Spain). Acta Oecol/Oecol Plant 9, 301-309.
- Hensen I. 2002. Impacts of anthropogenic activity on the vegetation of *Polylepis* woodlands in the region of Cochabamba, Bolivia. Ecotropica 8:183–203.
- Hjarsen, T. 1997. The effects of plantations in the Andes. *Tropical Forests Update* 7: 15.
- Holmes, R.L. 1983. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurements. Tree Ring Bull., 43, 69-75.

- Jaksic F., Marquet P. y González H. 1997. Una perspectiva ecológica sobre el Uso del Suelo del Agua en el Norte Grande: La Región de Tarapacá como estudio de caso. Trabajo presentado en seminario “Minería y uso de agua de Chile”. Centro de Estudios Públicos.
- IPCC. 2007. Climate change 2007: the physical science basis. In: Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M., Miller, H.L. (Eds.) Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge.
- Kessler M. 1995. Revalidación de *Polylepis rugulosa* Bitter (Rosaceae). *Gayana Botanica* 52(2): 49-51.
- Kessler M. 2006. Bosques de *Polylepis*. *Botánica Económica de los Andes Centrales*. Universidad Mayor de San Andrés, La Paz. p. 110-120.
- Kessler, M y Schmidt-Lebuhn, A. 2006. Taxonomical and distributional notes on *Polylepis* (Rosaceae). *Organism, Diversity & Evolution* 5. Electr. Suppl. 13 . 1-10.
- Korner, C. M. Ohsawa. 2005. Mountain Systems. Chapter 24. In: R. Hassan, R. Scholes, and N. Ash, (eds.). *Ecosystems and human well-being: current state and trends*, Volume 1. Washington, DC: Island Press. p. 681-716.
- Lazcano J, Espinoza D. 2001. Tendencia en el uso de leña en dos comunidades con bosques de *Polylepis* con énfasis en variables económicas. *Rev Bol de Ecol* 9:61–77.
- Macek P., Mackova J. De Bello F. 2009. Morphological and ecophysiological traits shaping altitudinal distribution of three *Polylepis* treeline species in the dry tropical Andes. *Acta Oecologica* 35 (2009) 778–785.
- Minvielle, M., and Garreaud, R. 2011. Projecting rainfall changes over the South American Altiplano. *J. Climate*, 24, 4577-4583.
- Morales, M.S., Villalba, R., Grau, H.R., Paolini, L., 2004. Rainfall-controlled tree growth in high-elevation subtropical treelines. *Ecology* 85, 3080–3089.
- Morales M.S., Christie D.A., Villalba R., Argollo J., Pacajes J., Silva J.S., Alvarez C.A., Llancabure J.C., Solíz C. 2011. Precipitation changes in the South American Altiplano since 1300 AD reconstructed by tree-rings. *Climate of the Past Discussions* 7: 4297-4334.
- Muñoz A. E. Bonacic C. 2006. Variación estacional de la flora y vegetación en la precordillera andina de la comuna de Putre (I Región de Tarapacá, Chile) Durante el periodo 2002-2003. *Gayana Bot.* 63(1): 75-92.
- Purcell J, Brelsford A. 2004. Reassessing the causes of decline of *Polylepis*, a tropical subalpine forest. *Ecotropica* 10:155–158.

- RM-C Arquitectos. 2006. Levantamiento del plan seccional de Putre y otras localidades, Putre. Anexo 2: Antecedentes bioecológicos del espacio ecoambiental.
- Roig, F., M. Fernandez, E. Gareca, S. Altamirano, S. Monge. 2001. Estudios dendrocronológicos en los ambientes húmedos de la Puna Boliviana. *Revista Boliviana de Ecología y Conservación Ambiental* 9: 3- 13.
- Schmidt-Lebuhn, A.N., Kumar, M., Kessler, M., 2006. An assessment of the genetic population structure of two species of *Polylepis* Ruiz & Pav. (Rosaceae) in the Chilean Andes. *Flora* 201, 317–325.
- Serra M, R Gajardo A. Cabello. 1986. *Polylepis besseri* Hieron. Especie Vulnerable. Ficha técnica de especie amenazada. CONAF. 21 p.
- Schulman, E., 1956. Dendroclimatic changes in semiarid America. Univ. of Arizona Press, Tucson.
- Sielfeld, W., C. Carrasco, G. González, J. Torres, A. Carevic y I. Ilanino. 1988. Estudio de la taruca (*Hippocamelus antisensis*) en Chile. Informe final Proyecto CONAF/PNUD7FAO-CHI/83/017, Arica. 97 p.
- Sielfeld, W., C. Carrasco, G. González & J. Torres. 1999. La taruca (*Hippocamelus antisensis* D'Orbigny 1834, Cervidae, Artiodactyla) en la provincia de Parinacota, Región de Tarapacá, Chile: Población, hábitat y alimentación. *Anales del Museo de Historia Natural de Valparaíso* 24: 95-108.
- Simpson B. 1993. Una revisión del género *Polylepis* (Rosaceae: Sanguisorbeae). Escuela Técnica Superior Forestal. Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba.
- Solíz, C., Villalba, R., Argollo, J., Morales, M.S., Christie, D.A., Moya, J., Pacajes, J. 2009. Spatio-temporal variations in *Polylepis tarapacana* growth across the Bolivian Altiplano during the 20th century. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 281, 296–308.
- Stokes, M.A., Smiley, T.L., 1968. An introduction to tree-ring dating. Univ. Chicago Press, Chicago. 73p.
- Tobón, C. 2009. *Los bosques andinos y el agua*. Serie investigación y sistematización #4. Programa Regional ECOBONA – INTERCOOPERATION, CONDESAN. Quito, mayo 2009.
- Villalba, R. 2000. Métodos en Dendrogeomorfología y su potencial uso en América del Sur. p. 103-118. In F. Roig (ed.) *Dendrocronología en América Latina*. Ediciones Universidad Nacional de Cuyo. Mendoza, Argentina.

- Villalba R., Delgado S., De Membiela M. Mendoza D. 2006. Variabilidad interanual de los caracteres anatómicos en el leño de *Cedrela lilloi* en el noroeste de Argentina. *Ecología y producción de cedro (género Cedrela) en las Yungas australes*. In Pacheco, S. A. Brown (Eds.). LIEY-ProYungas. Argentina. pp. 59-82. 2006.
- Villalba, R., Lara, A., Masiokas, M., Morales, M., Christie, D., Garibotti, I., Boninsegna, J.A., Le Quesne, C., Aravena, J.C. 2009. Variaciones climáticas en la Cordillera de los Andes durante los últimos 1000 años inferidas a partir de registros paleoambientales de alta resolución. Primer Congreso de Oceanografía Física, Meteorología y Clima. Universidad de Concepción, Chile.
- Vuille, M., Bradley, R.S., Keimig, F., 2000. Interannual climate variability in the Central Andes and its relation to tropical Pacific and Atlantic forcing. *Geophys. Res. Lett.* 105, 12447–12460.
- Wigley, T.M.L., Briffa, K.R., and Jones, P.D. 1984. On the average value of correlated time series, with applications in dendroclimatology and hydrometeorology. *J. Clim. Appl. Meteorol.*, 23, 201-213.
- Yallico E. 1992. Distribución de *Polylepis* en el sur de Puna. Editorial Arbolandino, Pomata. Perú. pp 22.

Anexo 1

Estación meteorológica	Código	Coordenadas (Lat S/Long W)	Altitud ms.n.m.
Caquena	CAQ	18°03` / 69°12`	4.400
Putre	PUT	18°11` / 69°33`	3.545
Cotacotani	COT	18°11` / 69°13`	4.550
Chungará	CHU	18°16` / 69°06`	4.600
Belén	BEL	18 °28` /69° 30`	3.240
Tignamar	TIG	18 34` / 69 29`	3.230
Central Chapiquiña	CHA	18°22`/69° 32`	3.350

Registro de estaciones meteorológicas utilizadas en este estudio.