

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO

MEMORIA DE TÍTULO

**ANÁLISIS DEL CRECIMIENTO RADIAL DE LOS BOSQUES DE *NOTHOFAGUS*
PUMILIO EN UN GRADIENTE DE PRECIPITACIÓN EN LA REGIÓN DE AYSÉN.**

José Manuel Velásquez González

**Santiago, Chile
2024**

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO

MEMORIA DE TÍTULO

ANÁLISIS DEL CRECIMIENTO RADIAL DE LOS BOSQUES DE *NOTHOFAGUS PUMILIO* EN UN GRADIENTE DE PRECIPITACIÓN EN LA REGIÓN DE AYSÉN.

RADIAL GROWTH ANALYSIS OF *NOTHOFAGUS PUMILIO* FORESTS IN A PRECIPITATION GRADIENT IN THE AYSÉN REGION.

José Manuel Velásquez González

Santiago, Chile
2024

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO

ANÁLISIS DEL CRECIMIENTO RADIAL DE LOS BOSQUES DE *NOTHOFAGUS PUMILIO* EN UN GRADIENTE DE PRECIPITACIÓN EN LA REGIÓN DE AYSÉN.

Memoria para optar al Título Profesional de:
Ingeniero en Recursos Naturales Renovables

José Manuel Velásquez González

Profesores Guías

Sr. Álvaro Gutiérrez I.
Ingeniero Forestal, Ph.D.



7,0

Sr. Daniel P. Soto S.
Ingeniero Forestal, M.S., Ph.D.

7,0

Profesores Evaluadores

Sr. Mauricio Galleguillos T.
Ingeniero Agrónomo, M.S., Ph.D.



6,5

Srta. Gabriela Lankin V.
Ingeniera Agrónoma, M.S., Ph.D.


Gabriela Olga
Lankin Vega
8.669.498-0
09/08/2024 - 14:47
UNIVERSIDAD
DE CHILE
ESTE DOCUMENTO CONTIENE FIRMA ELECTRÓNICA AVANZADA
<https://ceropapel.uchile.cl/validacion/verificador>
CV: dh9p4zx7cism3addkobb3mnqtc

6,5

Santiago, Chile
2024

AGRADECIMIENTOS

Estas palabras al inicio del presente trabajo son realmente las últimas que escribo como estudiante de ingeniería en recursos naturales renovables de la Universidad de Chile, las que corresponden únicamente a palabras de agradecimiento para todas las personas que estuvieron presentes en este largo camino lleno de altos y bajos y que, para el día de hoy, llega a su fin.

En primera instancia quisiera agradecer a mi familia, a mis padres Claudio y María José, y a mi hermana Josefa que me dieron la oportunidad y el apoyo incondicional para irme muy lejos de casa a poder realizar mis estudios, sin ellos el paso por la universidad y la realización del presente trabajo jamás hubiera sido posible. También quisiera agradecer a mi familia que vive en Santiago, que me acompañaron estando tan lejos de casa, especialmente a mi tía Francisca, quien me dio un techo para vivir en mis primeros años y fue como una madre para mí durante ese período.

Por otra parte, quisiera agradecer profundamente al profesor Daniel Soto, con quién ya llevamos trabajado desde el inicio de este trabajo en Aysén, y a quien veo como un gran guía tanto en el ámbito académico como profesional y personal. Muchas gracias por la paciencia, los consejos y las conversaciones que hemos tenido durante todo este tiempo y que van más allá de este trabajo de titulación como tal. También mencionar el agradecimiento a los proyectos Fondecyt 11181140 y Fondecyt 1221593 dirigidos por el profesor Daniel Soto los cuáles dieron vida a este trabajo de titulación en particular. Por otra parte, quisiera agradecer a los estudiantes de la Universidad de Aysén, Alan, Alonso y Manuel con quienes realizamos múltiples trabajos para ambos proyectos Fondecyt y que han estado presentes en el tramo final de este trabajo de titulación.

Quisiera agradecer al profesor Álvaro Gutiérrez por toda la paciencia y el apoyo para la realización de este trabajo, quién con sus múltiples comentarios y recomendaciones me guio durante todo este proceso para lograr un trabajo de calidad. Por otra parte, también quisiera agradecer a Vinci Urra, quien me dio múltiples consejos y recomendaciones gracias a su experiencia laboral y dentro del ámbito de la dendrocronología, sin su ayuda la realización de este trabajo hubiera sido mucho más complicada para mí.

Por último, quisiera agradecer a las grandes amistades que hice durante mi estadía en Santiago y mi paso por Antumapu: Chaga, Eve, Ivana, Luciano, Manu, Mati, Nicole, Pedro, Peque, Samu, Sofi, con quiénes pasamos largas noches de trabajo, risas, alegrías, penas y que sin ellos no podría recordar con tanto cariño el paso por la Universidad.

ÍNDICE

RESUMEN.....	1
ABSTRACT.....	2
INTRODUCCIÓN	3
Objetivo general.....	5
Objetivos específicos	5
MATERIALES Y MÉTODOS	6
Materiales	6
Área de Estudio.....	6
Características de los sitios	7
Clima.....	7
Suelos.....	7
Tipo forestal.....	7
Establecimiento de parcelas y recolección de muestras	9
Obtención de variables climáticas	9
Métodos.....	10
Procesamiento de muestras.....	10
Creación de series individuales de anchos de anillo	10
Cofechado o datación cruzada.....	11
Identificación de señal dominante de crecimiento.....	11
Estandarización de anillos de crecimiento	12
Desarrollo de cronologías de anchos de anillos.....	12
Análisis de la respuesta de crecimiento radial ante la variabilidad climática local ...	13
RESULTADOS.....	15
Desarrollar cronologías de crecimiento radial a lo largo de un gradiente de precipitación	15
Determinar la influencia del clima sobre los patrones de crecimiento de <i>Nothofagus pumilio</i>	18
DISCUSIÓN.....	24
Reconocimiento de patrón dominante de crecimiento.....	24
Identificación de años específicos de aumento y disminución del crecimiento	25
Reconocimiento de patrones comunes del crecimiento radial	26
Identificación de las variables climáticas con mayor influencia	27
Aumento de la influencia de variables climáticas desde la década de 1990	28
Contribuciones y recomendaciones para futuras investigaciones	28
CONCLUSIONES	30
BIBLIOGRAFÍA.....	31

Índice de Cuadros

Cuadro 1: Media (desviación estándar) de las características principales de cada uno de los sitios de estudio.	8
Cuadro 2: Estadísticos descriptivos de las series individuales y de las cronologías residuales de cada uno de los sitios.	16

Índice de Figuras

Figura 1: Área de estudio.	6
Figura 2: Diferencias en el subtipo forestal lenga dentro del gradiente de precipitación ...	8
Figura 3: Cronologías residuales del Índice de Ancho de Anillos (IAA) de los tres sitios de estudio dentro del gradiente de precipitación en la Región de Aysén.....	17
Figura 4: Modelos de regresión lineal simple aplicados sobre los Índice de Anchos de Anillos (IAA) de las cronologías residuales para el período de 1979-2019.	18
Figura 5: Correlaciones estáticas entre las distintas variables climáticas y las cronologías residuales de cada sitio para el período 1979-2019.....	19
Figura 6: Correlaciones móviles de los Índices de Anchos de Anillo IAA con la variable de precipitación para las estaciones de otoño y primavera.	21
Figura 7: Correlaciones móviles de los Índices de Anchos de Anillo (IAA) con la variable de temperatura máxima para las estaciones de verano y otoño.....	22

RESUMEN

Desde el siglo XXI se han evidenciado cambios en las precipitaciones y aumentos en las temperaturas que no tienen precedentes en la historia humana. Los anillos de crecimiento arbóreo, estudiados a través de la dendrocronología, proporcionan un valioso registro biológico para reconocer los efectos del cambio climático, permitiendo explorar la influencia de factores ambientales y biológicos en el crecimiento arbóreo a lo largo del tiempo. Múltiples estudios dendrocronológicos se han realizado para reconocer los efectos del cambio climático sobre el crecimiento arbóreo, principalmente en zonas limitantes para el crecimiento arbóreo (e.j. límite altitudinal arbóreo) y considerando el efecto de la variación en las temperaturas, sin embargo, el presente estudio se realizó en zonas bajas y considerando variaciones en las precipitaciones, las que también se consideran como un factor limitante para la productividad forestal. Para reconocer los efectos de las variaciones de precipitaciones, se colectaron 154 muestras de *Nothofagus pumilio* (Poepp et Endl.) Krasser (lenga), provenientes de árboles ubicados en tres sitios (húmedo, mésico y seco) dentro de un gradiente de precipitación, en la Región de Aysén. Estas muestras fueron procesadas con métodos dendrocronológicos, se agruparon según la tendencia dominante del crecimiento dentro del gradiente y se estandarizaron mediante el ajuste a curvas exponenciales negativas, para generar cronologías de anchos de anillos en cada sitio. Estas cronologías se correlacionaron con variables climáticas locales, mediante análisis estáticos y móviles. Las tres cronologías mostraron una disminución del crecimiento en los años 1900 y 1949, y un aumento de este en el año 1976, que fue constante hasta la década de 1980. Desde mediados de la década de 1980 se observó una disminución del crecimiento hasta el año 2019. El análisis estático mostró mayores correlaciones con la precipitación y la temperatura máxima, en las estaciones de otoño y primavera, mientras que el análisis móvil mostró que estas dos variables fueron más influyentes a partir del año 1995. El presente estudio considera un aporte para ampliar el conocimiento sobre la influencia climática sobre el crecimiento arbóreo, utilizando árboles provenientes de zonas las cuáles no se han utilizado tradicionalmente para este tipo de estudios dendrocronológicos.

Palabras clave: *Nothofagus pumilio*, dendrocronología, gradiente de precipitación, zona no limitante.

ABSTRACT

Since the 21st century, unprecedented changes in precipitation and increases in temperatures have been evidenced in human history. Tree growth rings, studied through dendrochronology, provide a valuable biological record to recognize the effects of climate change, allowing exploration of the influence of environmental and biological factors on tree growth over time. Multiple dendrochronological studies have been conducted to recognize the effects of climate change on tree growth, mainly in areas limiting tree growth (e.g., the altitudinal tree line) and considering the effect of temperature variation. However, the present study was conducted in lowland areas and considering variations in precipitation, which are also considered a limiting factor for forest productivity. To recognize the effects of precipitation variations, 154 samples of *Nothofagus pumilio* (Poepp et Endl.) Krasser (lenga) were collected from trees located in three sites (wet, mesic, and dry) within a precipitation gradient in the Aysén Region. These samples were processed using dendrochronological methods, grouped according to the dominant growth trend within the gradient, and standardized by fitting negative exponential curves to generate ring-width chronologies at each site. These chronologies were correlated with local climate variables through static and moving analyses. The three chronologies showed a decrease in growth in the years 1900 and 1949 and an increase in 1976, which was constant until the 1980s. Since the mid-1980s, a decrease in growth was observed until 2019. The static analysis showed higher correlations with precipitation and maximum temperature in the autumn and spring seasons, while the moving analysis showed that these two variables were more influential from 1995 onwards. The present study contributes to expanding knowledge about the climatic influence on tree growth by using trees from areas not traditionally used for this type of dendrochronological study.

Key words: *Nothofagus pumilio*, dendrochronology, precipitation gradient, non-limiting zone.

INTRODUCCIÓN

Los anillos de crecimiento de especies arbóreas representan un valioso registro biológico para conocer los factores que han influido el crecimiento de los árboles a distintas escalas temporales y espaciales (LaMarche, 1974). Debido a que el crecimiento de los árboles está influenciado por lo general por las condiciones ambientales, principalmente climáticas, por características bióticas (e.j. interacciones entre especies e individuos, edad), y también por las condiciones intrínsecas de cada sitio dada su ubicación geográfica, es que el estudio de los anillos de crecimiento a través del tiempo permite explorar la relación del crecimiento con los elementos del medio ambiente (Fritts, 1976). La disciplina que estudia los anillos de crecimiento de los árboles corresponde a la dendrocronología, que propone una serie de principios, técnicas y métodos para fechar y medir los anillos de crecimiento de un árbol, y extraer la información acerca de los factores que lo influyen, ya sean biológicos o climáticos para un lugar determinado a lo largo del tiempo (Fritts y Swetnam, 1989).

En regiones templadas el crecimiento radial de las especies arbóreas se encuentra limitado de manera general por las variables climáticas locales (i.e., temperatura y precipitación), y la estacionalidad que estas tienen (Donoso, 1993). En estos climas, la marcada estacionalidad permite que los árboles tengan anillos de crecimiento anuales, y por ello muchas de estas especies funcionan como un excelente “proxy” para estudios dendrocronológicos (Cook y Kairiukstis, 1990; Fritts, 1976). Sumado a lo anterior, las especies arbóreas de climas templados que se encuentran en zonas limitantes para el crecimiento (e.g. límite altitudinal arbóreo), poseen una mayor sensibilidad a las variaciones del clima a escalas anuales y decadales (Camarero *et al.*, 2015; Fritts, 1976). Gracias a estas características, en los últimos años, dentro del contexto del cambio climático global, donde se esperan cambios en la frecuencia, intensidad y magnitud de eventos climáticos, tales como alteraciones en los patrones normales de precipitaciones y un aumento de las temperaturas de más de 1,5°C, el estudio dendrocronológico de las especies arbóreas de los bosques templados cobra una gran relevancia gracias a la información contenida en sus anillos de crecimiento (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2018; Olivares-Contreras *et al.*, 2019; Srur *et al.*, 2008).

Una de las especies de los bosques templados de Sudamérica comúnmente utilizada para estudios dendrocronológicos corresponde a *Nothofagus pumilio* (Poepp et Endl.) Krasser (lenga). Esta especie posee una gran distribución geográfica y, en Chile, esta se encuentra comúnmente en la cordillera de Los Andes dominando el límite altitudinal arbóreo y cubriendo alrededor de 2.200 kilómetros entre los 35° 36' S y 55° 31' S (Lara *et al.*, 2005). Debido a su amplia distribución es que lenga posee un amplio nicho ecológico el que, en la Región de Aysén, está dado principalmente por dos gradientes climáticos: el latitudinal y el longitudinal (Pisano, 1977). El gradiente latitudinal se caracteriza principalmente por generar la estacionalidad de las temperaturas y precipitaciones (Olivares-Contreras *et al.*, 2019). Además de lo anterior, a través del gradiente latitudinal existe una disminución

gradual de las temperaturas a nivel local en dirección Norte-Sur (Garreaud *et al.*, 2009; Olivares-Contreras *et al.*, 2019). Por su parte, el gradiente longitudinal se caracteriza por una marcada disminución de las precipitaciones locales en sentido Oeste-Este, desde los ~4000 mm de precipitación media anual (PMA), en la zona de los fiordos de la costa del océano pacífico hasta los ~400-500 mm de PMA en la zona de la estepa Patagónica (Olivares-Contreras *et al.*, 2019; Stolpe y Hepp, 2014). Ambos gradientes bioclimáticos presentes en la región de Aysén se encuentran modulados por tres forzantes climáticas de gran escala; 1) “El Niño” Oscilación del Sur (ENSO, por sus siglas en inglés), 2) la Oscilación Antártica (AAO, por sus siglas en inglés), y 3) la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO, por sus siglas en inglés), las cuales tienen efectos diferenciados sobre los patrones de temperaturas y precipitaciones a nivel local (Olivares-Contreras *et al.*, 2019; Wolter, 1987; Zambrano, 1986). Estas forzantes climáticas poseen dos fases, una positiva (cálida) y una negativa (fría), y de manera general, en Chile continental las fases positivas (negativas) generan aumento en la temperatura del aire y disminuciones en las precipitaciones locales (Garreaud *et al.*, 2009; Schneider y Gies, 2004). En las últimas décadas se ha evidenciado una prevalencia de las fases positivas de estas tres forzantes climáticas, lo que ha generado una disminución en el crecimiento radial de especies arbóreas de manera generalizada (Fajardo *et al.* 2019; Garreaud *et al.*, 2009).

Dados estos antecedentes es que múltiples estudios dendrocronológicos se han realizado para reconocer la influencia que posee el clima sobre los patrones de crecimiento radial de lenga. Dada la amplia distribución de esta especie es que estos estudios proveen información relevante sobre el efecto del clima y sus forzantes sobre los patrones de crecimiento radial de especies arbóreas de la zona templada de América del Sur, gracias a lo que es posible generar un contexto más robusto para poder entender los efectos del cambio climático en esta zona (e.g. Álvarez *et al.*, 2015; Gibson-Carpintero *et al.*, 2022; Lara *et al.*, 2005; Serrano-León y Christie, 2020). Muchos de estos estudios dendrocronológicos sobre lenga tienen en común que se han realizado en zonas limitantes para su crecimiento (i.e. límite altitudinal arbóreo), en donde la influencia del clima sobre el crecimiento radial es más notoria, sin embargo, escaso o nulo es el conocimiento sobre los efectos que posee el clima local en zonas de baja elevación, tales como son las zonas de grandes parches de bosques de los andes Patagónicos. Sumado a esto, la gran mayoría de los estudios dendrocronológicos para lenga se han realizado dentro del gradiente latitudinal (Norte-Sur) de su distribución, lo cual es mayoritariamente asociado a variaciones de temperatura, siendo esta variable climática considerada como el factor más limitante para el crecimiento de esta especie (Lara *et al.*, 2001; Lara *et al.*, 2005). Sin embargo, el efecto de la variación de las precipitaciones también podría ser un factor limitante a escala más pequeña, en zonas donde la temperatura es más homogénea. Esta hipótesis cobra importancia, ya que son escasos los estudios realizados en lenga que consideran su gradiente longitudinal (Oeste-Este), el cual es particularmente importante y marcado en la región de Aysén, el que está fuertemente asociado a la variación en las precipitaciones, la cual es una variable de suma importancia en cuanto a la productividad primaria neta y otras variables de estado de rodal en los bosques de lenga (Soto *et al.*, 2022).

En la zona de los andes Patagónicos en la Región de Aysén, debido al cambio climático se

estima que para el siglo XXI existirá una reducción en las precipitaciones entre un 10 a un 20% bajo la media, sumado a un aumento en las temperaturas que oscilarán entre 1 y 2,5°C (Olivares-Contreras *et. al.*, 2019). Bajo este panorama y considerando los pocos estudios realizados para lenga en la región de Aysén, la presente memoria propone el uso de métodos dendrocronológicos estandarizados para reconocer los patrones de crecimiento de lenga asociados a un gradiente acotado de precipitaciones (600-1000 mm de precipitación media anual) en los Andes Patagónicos de Aysén. El poder reconocer estos patrones de crecimiento, su vínculo con el clima y las forzantes climáticas que modulan estos climas, son de una suma relevancia para dar luces del futuro de los bosques de lenga en la región de Aysén.

Objetivo general

Analizar los patrones de crecimiento en bosques de *Nothofagus pumilio* en un gradiente de precipitación en la Región de Aysén.

Objetivos específicos

1. Desarrollar cronologías de crecimiento radial a lo largo de un gradiente de precipitación.
2. Determinar la influencia del clima sobre los patrones de crecimiento de *Nothofagus pumilio*.

MATERIALES Y MÉTODOS

Materiales

Área de Estudio

El área de estudio se ubica en la Patagonia Oeste, en la zona de la sub-montaña de los Andes Patagónicos de la Región de Aysén (Figura 1). Dentro de esta zona se seleccionaron tres sitios, distanciados entre sí por alrededor de 20 km en línea recta. Estos sitios están ubicados dentro de un gradiente de precipitación documentado por Stolpe y Hepp (2014). En dirección Oeste-Este los sitios son: el sitio húmedo ubicado en Lago Largo ($45^{\circ}13' S$; $71^{\circ}51' O$; 940 m.s.n.m.); el sitio mésico que corresponde a la Reserva Nacional Trapananda ($45^{\circ}21' S$; $71^{\circ}48' O$; 950 m.s.n.m.) y el sitio seco ubicado en Coyhaique Alto, específicamente en la Hacienda Punta del Monte ($45^{\circ}24' S$; $71^{\circ}34' O$; 1050 m.s.n.m.).

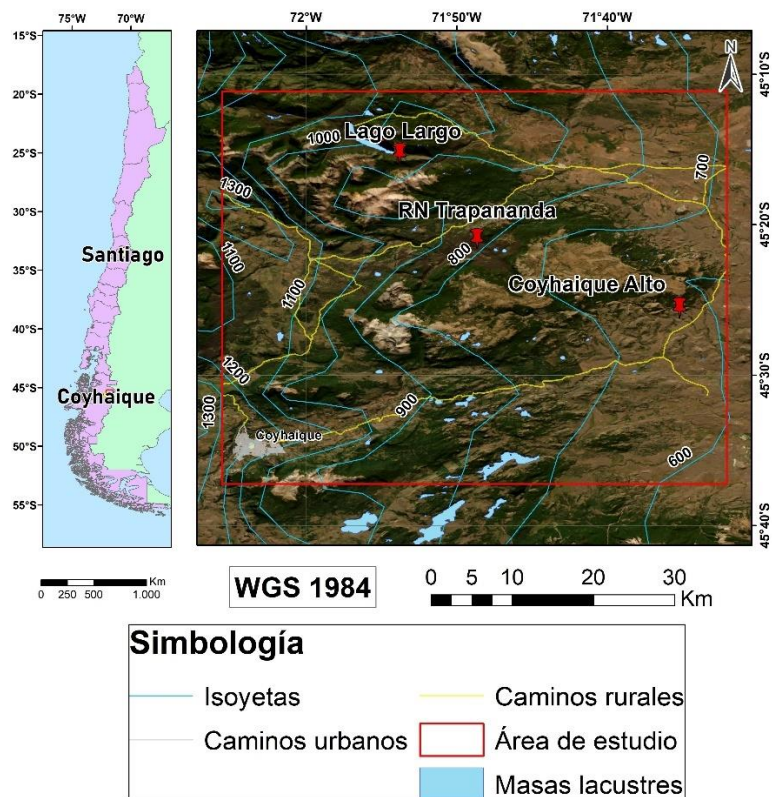


Figura 1: Área de estudio. Se muestran los tres sitios donde se colectaron las muestras. Las líneas amarillas corresponden a las rutas de acceso a cada sitio. Las líneas celestes corresponden a las variaciones de precipitaciones dentro del gradiente longitudinal.

Características de los sitios

Clima. Dentro del gradiente longitudinal de la Región de Aysén existe una transición de un clima templado lluvioso en el archipiélago de la costa del océano Pacífico a un clima templado cálido en la estepa Patagónica, lo que genera variaciones en las precipitaciones en el sentido Oeste-Este (Stolpe y Hepp, 2014; Olivares-Contreras *et al.*, 2019). En la zona de la sub-montaña donde crecen los bosques adultos de Lenga las precipitaciones caen desde 2000 mm de precipitación media anual (PMA) en la zona más Oeste hasta alcanzar los 400-500 mm de PMA en la zona Este, cercano a la estepa Patagónica, en una distancia que no supera los 50 km (Pisano, 1977; Soto *et al.*, 2021). Dentro de este gradiente longitudinal en sentido Oeste-Este, el sitio húmedo (Lago Largo) ocurren 994 ± 19.3 mm de PMA, en el sitio mésico (RN Trapananda) 817 ± 20.1 mm, y en el sitio seco (Coyhaique alto) 613 ± 18.6 mm. Por su parte las temperaturas varían en cada sitio desde 5.1 ± 0.4 °C en el sitio húmedo, 4.8 ± 0.2 °C en el sitio mésico y 4.6 ± 0.3 °C en el sitio seco. Soto *et al.* (2021) destaca que estos sitios a nivel general son diferentes en términos de precipitación y no en cuanto a la temperatura media anual. Estas diferencias se pueden observar de igual manera dentro del Cuadro 1.

Suelos. Los suelos de los sitios húmedo y mésico son clasificados taxonómicamente como Andisoles, por lo que se desarrollaron a partir de cenizas volcánicas y poseen las características de ser poco profundos, con gran cantidad de materia orgánica descompuesta, bajo pH y ser pobres en nutrientes (Centro de Información de Recursos Naturales [CIREN], 2005; Hildebrand-Vogel *et al.*, 1990). Por su parte los suelos en el sitio seco pertenecen a la serie de suelos “Ñirehuao” que se caracterizan por tener una textura franco-arenosa en la superficie y ser formados a partir de material glaciario (CIREN, 2005). Estos se clasifican taxonómicamente como Inceptisoles, en el suborden de los Dysterudepts, que se caracterizan por ser poco desarrollados, tener un pH bajo, no tener contenido de materia orgánica (o en muy baja medida) y ser pobres en cuanto a nutrientes (CIREN, 2005). Dentro del Cuadro 1 se pueden observar las características generales de los suelos de cada sitio.

Tipo forestal. Los tres sitios corresponden al tipo forestal Lenga y al subtipo forestal bosque de Lenga puro, la que corresponde a una especie arbórea caducifolia, semitolerante a la sombra, que puede superar los 30 metros de altura, alcanzar los 1,7 metros de diámetro y alcanzar edades cercanas a los 400 años (Donoso, 1981). Según Pisano (1977), el desarrollo, densidad y distribución de clases diamétricas y alturas de este Subtipo Forestal están condicionados principalmente por factores relativos al suelo y al clima local (Figura 2). Los sitios seleccionados se ubican dentro de los bosques puros de lenga los que se encuentran en un estado de desarrollo adulto, poseen estructuras diamétricas irregulares y presentan indicios de disturbios humanos ocurridos en los últimos 40 años (Soto *et al.*, 2022). Según Soto *et al.* (2021) los tres sitios difieren entre sí en diversas variables a nivel de rodal, encontrándose en el sitio seco una menor altura dominante y densidad arbórea (ver Figura 2), pero un mayor diámetro medio a diferencia de los sitios mésico y húmedo. En el sitio seco, la baja densidad arbórea sugiere limitaciones de sitio para el desarrollo del sotobosque (Soto *et al.*, 2021). Según la clasificación propuesta por Martínez-Pastur *et al.*

(1997) los sitios húmedo y mésico tienen una calidad de sitio media-alta, mientras que el sitio seco tiene una calidad de sitio pobre. Las características a nivel de rodal de cada uno de los sitios se pueden observar a continuación dentro del Cuadro 1.

Cuadro 1: Media (desviación estándar) de las características principales de cada uno de los sitios de estudio.

	Lago Largo	RN Trapananda	Coyhaique alto
Clima			
Precipitación media anual (mm)	994 (19,3)	817 (20,1)	613 (1,6)
Temperatura media anual (°C)	5,1 (0,4)	4,8 (0,2)	4,6 (0,3)
Características del suelo			
Grupo taxonómico	Andisoles	Andisoles	Inceptisoles
Textura de suelo	Franca	Franco arenosa	Franco arenosa
Contenido de agua volumétrica (%)	19,3 (3,1)	13,8 (1,9)	7,8 (1,4)
Características del rodal			
Año de disturbio	1971	1962	1967
Altura máxima (m)	19,3	16,7	12,6
DAP medio (cm)	12,4 (1,9)	12,6 (1,6)	21,9 (3,8)
Área basal (m ² /ha)	63,9 (25,1)	59,4 (4,9)	68,8 (8,4)
Densidad (árbol/ha)	3280 (1538)	2821 (993)	1379 (467)

Fuente: Soto *et al.* 2021; Soto *et al.*, 2022.



Figura 2: Diferencias en el subtipo forestal lenga dentro del gradiente de precipitación donde: a) corresponde al sitio húmedo, b) al sitio mésico y c) al sitio seco.

Establecimiento de parcelas y recolección de muestras

En cada uno de los sitios dentro del gradiente de precipitación Soto *et al.* (2021) establecieron 12 parcelas permanentes de 1600 m² (40 x 40 m) cada una, las cuales se agruparon en 4 bloques aleatoriamente distribuidos conformados por 3 parcelas cada uno, dentro de los bosques adultos de lenga donde se encontraron indicios de intervenciones humanas. En cada bloque se realizaron cortas de selección individual con diferentes tratamientos, siguiendo el método BDq. Con este método se seleccionaron árboles de todas (o la mayoría) de las clases diamétricas existentes en el rodal para alcanzar un área basal deseada, la cual fue definida previamente por Soto *et al.* (2021). En este método “B” corresponde al área basal que se desea mantener dentro del rodal, “D” corresponde al diámetro máximo a ser considerado y “q” es un factor numérico que relaciona la cantidad de árboles de una clase diamétrica, respecto a la cantidad de árboles de la clase siguiente (Guildin, 1991). En cada uno de bloques, Soto *et al.* (2021) realizaron tres tratamientos diferentes: (1) testigo, en el cual no se realizó ninguna intervención silvícola, y el cuál cumple con la finalidad de ser una parcela control, para su posterior comparación con los tratamientos posteriores, (2) cosecha fuerte, en la cual se dejó un área basal residual (B) de 35 m²/há, con un diámetro límite (D) de 60 cm y un valor q de 1.6 y (3) cosecha suave, en el cual se dejó un área basal residual (B) de 35 m²/há, con una diámetro límite (D) de 60 cm y un factor q de 1.6 (mayores detalles ver López-Wiederhold, 2024). Posterior a los tratamientos silviculturales anteriormente descritos, de los tres sitios se colectaron un total de 154 muestras provenientes de la misma cantidad de árboles diferentes, los cuales tienen representantes de cada una de las clases diamétricas que fueron cosechadas en los tres sitios. Específicamente, el manejo forestal para las parcelas que fueron intervenidas se realizó entre los meses de diciembre de 2019 y febrero de 2020. Las muestras corresponden a rodelas para aquellas con un diámetro menor a 15 cm de diámetro y cuñas para aquellas de diámetros mayores a 15 cm. Las rodelas y cuñas fueron obtenidas desde el diámetro a la altura del pecho de cada árbol.

Obtención de variables climáticas

Las variables climáticas se obtuvieron mensualmente para la precipitación, temperaturas media, máxima y mínima a partir de la plataforma explorador climático CR2MET (<https://www.cr2.cl/datos-productos-grillados/>) para cada uno de los sitios de estudio. Esta base de datos corresponde a modelos estadísticos que consideran mediciones meteorológicas instrumentales, topografía de los sitios, variables del reanálisis atmosférico del clima global (ECMWF ERA5) y estimaciones de temperatura superficial del sensor satelital de espectro-radiométrico (MODIS). De este conjunto de datos se obtuvieron, las medias mensuales de cada variable para cada año dentro del periodo 1979-2019 en formato ráster, con una resolución de 0.05 grados latitud-longitud (ca. 5km).

Métodos

Procesamiento de muestras

Se utilizaron los procedimientos dendrocronológicos estandarizados, propuestos por Stokes y Smiley (1968). En primera instancia para preparar las rodela y cuñas, estas muestras se secaron a temperatura ambiente y en condición de oscuridad con el fin de evitar el deterioro de estas. Luego se lijaron de manera gradual, comenzando con papel lija de grano grueso y disminuyendo su granulometría progresivamente, con el fin de posibilitar la observación de la anatomía de la madera de manera óptima (Fritts, 1976; Stokes y Smiley, 1968). Al observar los anillos de crecimiento de cada muestra se determinó el radio geométrico de cada una, como se muestra en la ecuación 1:

$$Rg = \frac{\sqrt{D_1 \cdot d_2}}{2}$$

Donde Rg corresponde al radio geométrico de una muestra, D_1 al diámetro mayor del árbol y d_2 al diámetro menor del árbol.

El radio geométrico corresponde a una representación simplificada de la forma del diámetro de un árbol y este se utiliza principalmente para evitar sesgos en la medición de los anchos de anillos, ya que esta medida considera la excentricidad de la médula de un árbol (Zhang *et al.*, 2021).

Creación de series individuales de anchos de anillo

Cada cuña y rodela fue escaneada en alta resolución (2400 dpi) utilizando un scanner de alta definición (EPSON Expression 12000XL). Posteriormente con el programa computacional WinDendro (Regent Instruments, Quebec, Canadá), se midió y fechó cada anillo de crecimiento desde la médula hasta la corteza, a través de la representación del radio geométrico previamente demarcado en cada muestra. Cada uno de los anillos de crecimiento se fechó mediante lo propuesto en la convención de Schulman (1956) para el hemisferio sur, la cual le asigna a cada anillo un año de calendario según la fecha en la que este inició su crecimiento (primavera), por lo que en este caso el último anillo generado se fechó para ese mismo año (2019). Al medir y fechar cada anillo de una muestra, se generaron las series individuales de crecimiento de cada una.

Cofechado o datación cruzada

Mediante el uso del programa computacional COFECHA (Holmes, 1982) se realizó el cofechado de cada serie individual de crecimiento, de cada sitio con el fin de mejorar la precisión en la medición y fechado de cada una. El cofechado corresponde al principio y metodología más importante de la disciplina de la dendrocronología (Cook y Kairiukstis, 1990; Fritts, 1976). Mediante la correlación entre cada una de las series individuales y una serie promedio o serie “maestra” es posible comprobar y corregir la medición y fechado de cada una de ellas, detectando anillos falsos o ausentes y así permitiendo asignarle un año de calendario exacto a cada serie individual (Fritts y Swetnam, 1989).

Las series individuales de los árboles provenientes del sitio méxico se cofecharon en conjunto con las series individuales realizadas por Gibson-Carpintero *et al.* (2022) en la Reserva Nacional Trapananda con el fin de aumentar la cantidad de árboles y así asegurar la precisión de las mediciones y fechados en este sitio. En los tres sitios se consideraron como aceptables las series individuales de los árboles que tuvieran una correlación significativa con la serie maestra mayor a 0.32 (Lara *et al.*, 2005).

Identificación de señal dominante de crecimiento

Se realizó un análisis de componentes principales (ACP), para un período en común de crecimiento, sobre todas las series individuales de los tres sitios en conjunto. Posteriormente se seleccionaron todas las series individuales que tienen una alta correlación de Pearson ($r \geq 0.45$) con el componente principal 1 (CP1) siguiendo lo propuesto por Gibson-Carpintero *et al.*, (2022), Rodríguez-Catón *et al.*, (2015); Rodríguez-Catón *et al.*, (2016). Esta metodología permite identificar los árboles que siguen una tendencia común de crecimiento, facilitando así la detección de la tendencia dominante a lo largo del gradiente de precipitación (Rodríguez-Catón *et al.*, 2015).

Debido a que el crecimiento de los árboles seleccionados por Soto *et al.* (2021) para las cortas de selección individual, provienen de zonas las cuáles se consideran como no limitantes para el crecimiento arbóreo, la influencia del clima sobre este es menor que en zonas que si lo son, además de que en ellas hay indicios de actividad humana, lo que también tiene influencia en el crecimiento debido a aperturas de dosel provocadas por perturbaciones a pequeña escala, como lo son las cortas selectivas (Camarero *et al.*, 2015). El ACP reduce el número de variables originales, en este caso las series individuales de crecimiento, a unas de pocas variables ortogonales (componentes principales) las cuales contienen la mayor parte de la varianza común de las series individuales (Rodríguez-Catón *et al.*, 2015). Del total de componentes principales el CP1 es el que contiene la mayor parte de la varianza común explicada, por lo que al seleccionar las series individuales que tienen una alta correlación de Pearson ($r \geq 0.45$) con el CP1 es posible agrupar aquellos árboles que tienen una tendencia común de crecimiento, la que corresponde a la tendencia dominante dentro del gradiente de precipitación (Lara *et al.*, 2005; Rodríguez-Catón *et al.*, 2015). El ACP se ejecutó con la función *prcomp* dentro de las funciones base disponibles

para el programa estadístico RStudio, mientras que la correlación entre las series individuales y el CP1 se realizó con la función *cor*, también disponible dentro de las funciones base del programa (Rstudio Team, 2018).

Estandarización de anillos de crecimiento

Aquellas series individuales agrupadas por el componente principal 1 (CP1) se separaron en sus respectivos sitios (húmedo, mésico y seco) y se estandarizaron mediante el ajuste a curvas exponenciales negativas (Álvarez *et al.*, 2015; Cook y Kairiutskis, 1990; Fritts, 1976; Lara *et al.*, 2005). Si bien aquellas series individuales agrupadas por el CP1 siguen una tendencia dominante de crecimiento dentro del gradiente de precipitación, estas mantienen tendencias de crecimiento individuales producidas por la edad, la geometría del árbol o bien producidas por disturbios locales dentro de cada sitio (e.g. apertura de dosel por la caída de árboles), por lo que resulta necesario estandarizar las series individuales de crecimiento para poder hacerlas comparables entre si (Fritts, 1976; Fritts y Swetnam, 1989). Este proceso de estandarización transforma las series individuales de crecimiento en Índices de Anchos de Anillo (IAA), los que tienen la principal característica de ser adimensionales, es decir, que tienen una media igual a 1 y una varianza que se mantiene constante a lo largo del tiempo (Fritts, 1976). Este proceso se ejecutó mediante el uso del paquete de funciones dendrocronológicas *dplr* (Bunn, 2008; Bunn, 2010; Bunn *et al.*, 2019) disponible para el software RStudio (Rstudio Team, 2018).

Desarrollo de cronologías de anchos de anillos

Al igual que la estandarización, el desarrollo de las cronologías se ejecutó mediante el paquete de funciones dendrocronológicas *dplr* (Bunn, 2008; Bunn, 2010; Bunn *et al.*, 2019). Las cronologías de anchos de anillos se realizaron promediando los Índices de Anchos de Anillos (IAA) de cada uno de los sitios mediante el método de la media robusta de Tukey, el cual minimiza los efectos producidos por valores atípicos dentro de una serie temporal (Álvarez *et al.*, 2015; Massaccesi *et al.*, 2008; Serrano-León y Christie, 2020). El paquete de funciones dendrocronológicas *dplr* genera dos cronologías de IAA al mismo tiempo: 1) cronología estándar la cual preserva la señal de baja frecuencia (i.e. cambios en el crecimiento a largo plazo), y 2) cronología residual, la cual elimina la autocorrelación existente entre el crecimiento radial de un año respecto a los años anteriores y en ella se preserva la señal de alta frecuencia (i.e. cambios interanuales en el crecimiento radial) (Fritts, 1976; Cook y Kairiutskis, 1990). Para poder enfatizar las variaciones decadales de cada cronología realizada (variaciones de baja frecuencia) se aplicó un filtro de 20 años definido por Essenwanger (1986), el cual se ha utilizado ampliamente para observar las variaciones decadales en el crecimiento de lenga (ver Álvarez *et al.*, 2015; Lara *et al.*, 2005).

La calidad de las cronologías se evaluó mediante los estadísticos entregados por el paquete de funciones dendrocronológicas *dplr*, los cuales corresponden a: 1) Coeficiente de

correlación medio (R_{bar}), 2) Señal expresada de la población (EPS, por sus siglas en inglés), y 3) Sensibilidad media. R_{bar} corresponde al coeficiente de correlación medio entre todas las combinaciones posibles de dos series individuales en un sitio, por lo que este estadístico indica que tan similar es el crecimiento de las series individuales de cada cronología (Briffa, 1995; Fritts, 1976). Por su parte, EPS es una medida de similitud entre la cronología de una población dada y una cronología hipotética generada a partir de todas las series individuales de crecimiento para períodos de tiempo determinados (Briffa, 1995). Este estadístico se utiliza para reconocer aquellos períodos de tiempo en que existe una señal común de crecimiento mayor, es decir, que los árboles de esa población crecen de manera similar (Fritts, 1976). Mayores valores de EPS indican que la cronología posee una fuerte señal común de crecimiento mientras que valores bajos de EPS sugieren una mayor variabilidad individual en el crecimiento (Briffa, 1995; Fritts, 1976). En este caso, como es comúnmente utilizado en lenga, el EPS se calculó mediante ventanas de tiempo de 50 años con un traslape de 25 años, que se consideró como aceptable aquellos períodos de tiempo en los que el $EPS > 0.8$ (Briffa, 1995; Lara *et al.* 2001; Lara *et al.*, 2005; Wigley 1984). Por su parte, la sensibilidad media corresponde al porcentaje promedio de cambio en cada uno de los anchos de anillos de una cronología dada, en relación con el anillo siguiente (Fritts, 1976). Valores cercanos a 0 sugieren un crecimiento más estable en el tiempo, mientras que valores cercanos a 1 sugieren un crecimiento desigual cada año, dado principalmente por factores de sitio (Fritts y Swetnam, 1989) Finalmente, para reconocer la tendencia de crecimiento (i.e. positiva o negativa) dentro del período en el cual existe disponibilidad de datos climáticos (1979-2019) se aplicaron modelos de regresión lineal sobre los IAA de las cronologías residuales de cada uno de los sitios.

Análisis de la respuesta de crecimiento radial ante la variabilidad climática local

Para examinar la relación que tienen las distintas variables climáticas (precipitación y temperaturas media, máxima y mínima) respecto a los Índices de Anchos de Anillos (IAA) de cada sitio, se utilizó el paquete de funciones *treeclim* (Zang y Biondi, 2013) disponible para el software RStudio, con el cuál se realizaron dos análisis de función de correlación: estáticos y móviles. Ambos análisis correlacionaron las variaciones interanuales de las cronologías residuales con las variables climáticas locales y entregaron coeficientes de correlación de Pearson con un nivel de confianza del 95% ($p < 0.05$), los que se calcularon mediante el método de remuestreo de arranque o “bootstrapping” (Álvarez *et al.*, 2015; Zang y Biondi, 2013). Este método consiste en tomar varias muestras pequeñas de los datos originales (IAA y variables climáticas) y calcular los coeficientes de correlación entre ellos varias veces, con lo que se asegura una estimación confiable de estos coeficientes (Zang y Biondi, 2013). Por su parte, el análisis de correlación estático se realizó utilizando todas las variables climáticas para un período de 22 meses, el cual considera la temporada de crecimiento anterior a la formación de un anillo ($t-1$) y la temporada actual a la formación de este (t) (Álvarez *et al.*, 2015; Gibson-Carpintero *et al.*, 2022). Este análisis de 22 meses se realizó ya que existe un efecto de memoria en el crecimiento radial, es decir, el crecimiento del anillo en un año en específico no está influenciado únicamente por las

condiciones climáticas del año en que este se formó, sino que también está influenciado por las condiciones de los años anteriores, esto gracias a la capacidad de almacenamiento de los árboles o bien por la acumulación o escasez de recursos en el sitio en donde estos se encuentren (Fritts, 1976). Este análisis de 22 meses se ejecutó para cada una de las estaciones del año, calculando el acumulado para la precipitación y la media para las temperaturas media, máxima y mínima en cada una de estas estaciones comenzando por invierno (i.e. junio, julio, agosto), primavera (i.e. septiembre, octubre, noviembre), verano (i.e. diciembre, enero, febrero) y finalmente otoño (marzo, abril, mayo) (Gibson-Carpintero *et al.*, 2022). Posteriormente, se ejecutó el análisis de correlación móvil, entre los IAA y las variables climáticas que mostraron mayores niveles de correlación en el análisis estático, en ventanas móviles de 20 años con un traslape de 1 año, con el fin de reconocer aquellos períodos de tiempo en que estas variables tienen una mayor influencia en el crecimiento radial de lenga (Gallardo *et al.*, 2024; Zang y Biondi, 2013). Al igual que en el análisis estático, en el análisis móvil se consideraron cada una de las estaciones del año (invierno, primavera, verano y otoño), tanto de la temporada anterior de crecimiento, como la actual (Zang y Biondi, 2013).

RESULTADOS

Desarrollar cronologías de crecimiento radial a lo largo de un gradiente de precipitación

El análisis de componentes principales (ACP) realizado para el período común de todas las muestras (1958-2019) mostró que el componente principal 1 (CP1) contribuyó con un total del 48.67% de la variabilidad total de los datos. Las mayores correlaciones con el CP1 ($r \geq 0.45$) agruparon un total de 97 árboles provenientes a los tres sitios (63 % del total de árboles correctamente cosechados). El Cuadro 2 muestra que del total de árboles 30.9% (30 árboles) se corresponden al sitio seco (Coyhaique alto, CA), 49.4% (48 árboles) de ellos al sitio mésico (Reserva Nacional Trapananda, RNT), y solamente un 19.7% (19 árboles) se corresponden al sitio húmedo (Lago largo, LL). De estos árboles agrupados por el CP1, aquellos provenientes de CA cubren el período de tiempo de 1766-2019, con edades que varían entre los 91 y los 254 años (ver Cuadro 2). Por su parte aquellos provenientes de RNT cubren el período de tiempo de 1708-2019 con edades que varían entre los 87 y los 312 años. Finalmente, aquellos árboles provenientes de LL cubren el período de 1769-2019, con edades que varían entre los 62 y los 224 años. Para el período completo de las series agrupadas por el CP1 de cada sitio el ancho medio de los anillos de crecimiento disminuye a la vez que disminuyen las precipitaciones dentro del gradiente, en dirección Oeste-Este (ver Cuadro 2).

En el Cuadro 2 se observa que, para el período completo de las series individuales, la media de crecimiento radial medio disminuye en concordancia con la disminución de precipitaciones dentro del gradiente (dirección Oeste-Este). Las cronologías residuales de los tres sitios tienen una señal común de crecimiento robusta ($EPS > 0.8$) para el período completo de 1895-2019. El coeficiente de correlación medio ($Rbar$), fue diferente para todos los sitios, siendo el más alto encontrado en el sitio mésico, seguido del sitio húmedo y finalmente el $Rbar$ más bajo se encuentra en el sitio seco. La sensibilidad media de los tres sitios es similar (cerca de 0.3), lo cual refleja la susceptibilidad de los árboles de los tres sitios a factores que limitan su crecimiento (ver Cuadro 2).

Cuadro 2: Estadísticos descriptivos de las series individuales y de las cronologías residuales de cada uno de los sitios.

Métrica	Lago largo	RN Trapananda	Coyhaique alto
Número de árboles/muestras	19	48	30
Período de tiempo	1769-2019	1708-2019	1766-2019
Edad media (años)	142	122	131
Edad mínima – máxima (años)	61-250	86-311	90-253
Ancho medio de anillo (mm/año)	1,27	1,18	0,76
Correlación entre series (r^2)	0,49	0,54	0,57
EPS > 0,8	1870-2019	1895-2019	1845-2019
Rbar	0,46	0,66	0,39
Sensibilidad media	0,3	0,32	0,29

EPS: señal de la población expresada, Rbar: coeficiente de correlación medio.

En la Figura 3 se observan las cronologías residuales a partir del año 1895, año desde el cual las tres cronologías poseen un EPS > 0.8. Dentro de las tres cronologías se detectaron dos disminuciones importantes de crecimiento durante los años 1900 y 1949. Por otra parte, en el año 1976 se encontró un aumento en el crecimiento radial de las tres cronologías residuales, siendo este el aumento más notorio en las cronologías de los sitios húmedo y mésico. Para el sitio seco, se registró un aumento en el crecimiento para el año 1964. Por otra parte, las disminuciones más importantes en el crecimiento para el sitio seco ocurrieron en los años 1949 y 1973, y en el sitio húmedo en los años 1900 y 1924. Por último, las disminuciones más importantes en el crecimiento para el sitio mésico (RNT) ocurrieron en los años 2014 y 2016, las cuáles son las mayores disminuciones en el crecimiento encontradas en cualquiera de los tres sitios para el período completo de 1895-2019 (Figura 3).

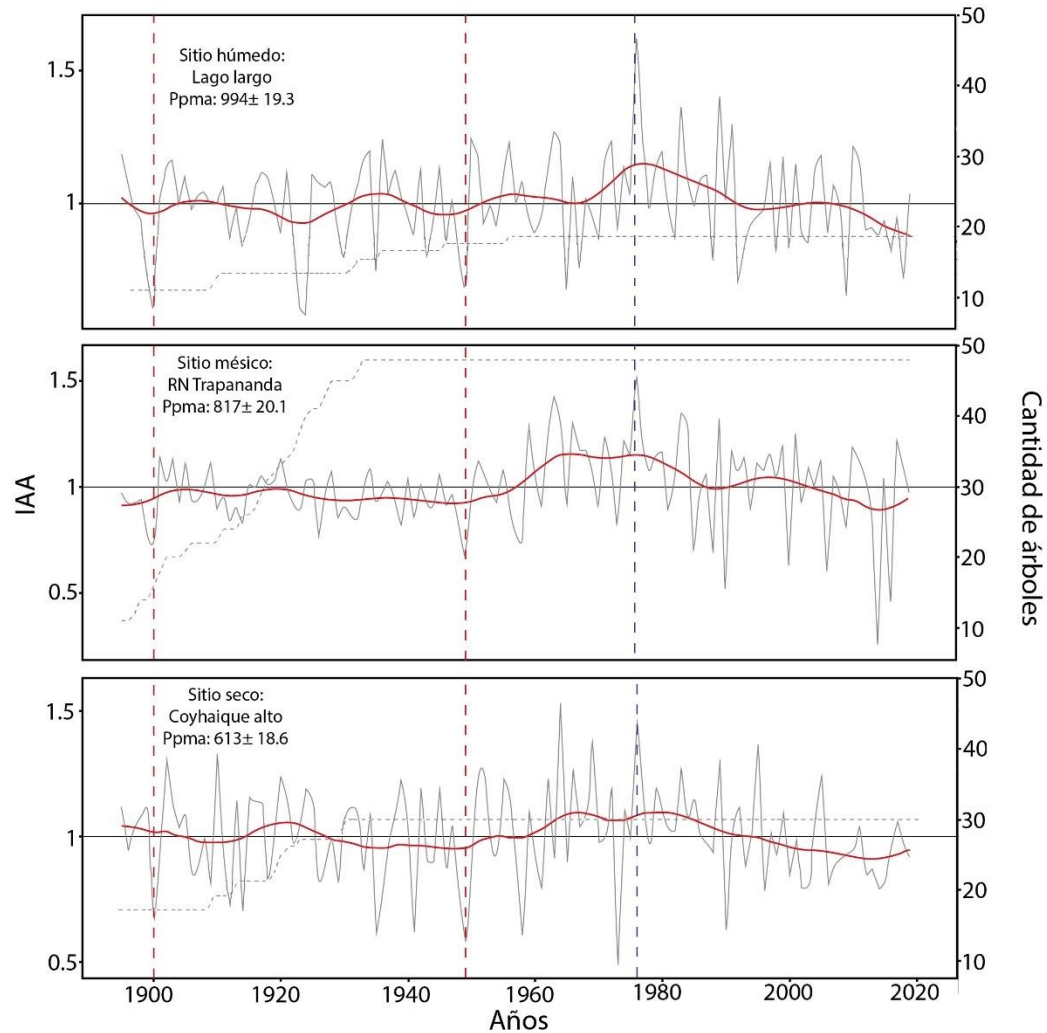


Figura 3: Cronologías residuales del Índice de Ancho de Anillos (IAA) de los tres sitios de estudio dentro del gradiente de precipitación en la Región de Aysén. Las líneas punteadas horizontales indican el número de series de cada cronología, las líneas punteadas verticales de color rojo indican años de disminución común en el crecimiento, y las líneas punteadas azules años de aumento común en el crecimiento. La curva roja representa un filtro de suavizado de 20 años para enfatizar las tendencias decadales del crecimiento radial.

A partir del filtro de suavizado de 20 años, en la Figura 3 se observa que el crecimiento se mantiene cercano a la media en los tres sitios hasta 1950 con períodos por sobre esta para los sitios húmedo y seco, no así para el sitio méxico, en el que el crecimiento se mantuvo por debajo de la media durante toda la primera mitad del siglo XX. La Figura 3 muestra que, a partir de la segunda mitad del siglo XX, se observan patrones de crecimiento común en las cronologías residuales de los tres sitios. Este patrón de crecimiento común se mantiene por sobre la media desde la década de 1960, acentuándose esta tendencia positiva a partir de la década de 1970 hasta mediados de la década de 1980. Desde mediados de la década de 1980

hasta el año 2019, se observa una disminución mantenida en el crecimiento, alcanzando valores por debajo de la media en los tres sitios a partir del año 2000 (Figura 3).

En la Figura 4 se observa que partir del año 1979, año en el cual existe disponibilidad de datos climáticos, hasta el año 2019 existe una tendencia de disminución en los Índices de Anchos de Anillos (IAA) de las cronologías residuales de cada sitio. Esta tendencia a la disminución de los IAA es más acentuada en el sitio seco, donde la pendiente del modelo de regresión es negativa y es mayor que en los sitios mésico y húmedo, los que tienen una pendiente relativamente similar (Figura 4).

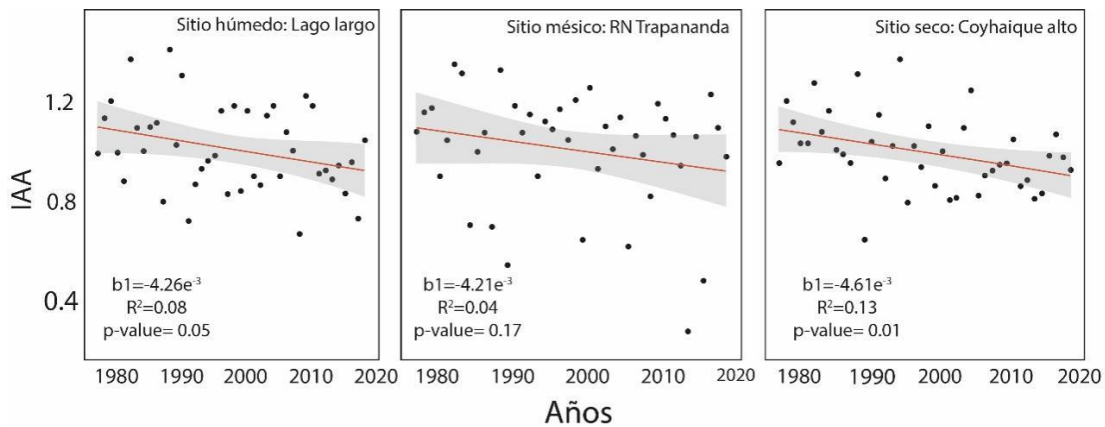


Figura 4: Modelos de regresión lineal simple aplicados sobre los Índice de Anchos de Anillos (IAA) de las cronologías residuales para el período de 1979-2019.

Determinar la influencia del clima sobre los patrones de crecimiento de *Nothofagus pumilio*

En la Figura 5 se pueden observar las correlaciones estáticas significativas ($p < 0.05$) encontradas en cada sitio dentro del gradiente de precipitación para cada una de las variables ambientales estudiadas. De manera general para todas las variables ambientales las mayores correlaciones se encontraron en el sitio seco las que varían entre $r = |0.26|$ y $r = |0.4|$. A este le sigue el sitio húmedo en el cual sus correlaciones varían entre $r = |0.21|$ y $r = |0.39|$, y finalmente las menores correlaciones encontradas de manera general corresponden a las del sitio mésico, que varían entre $r = |0.2|$ y $r = |0.36|$ (Figura 5).

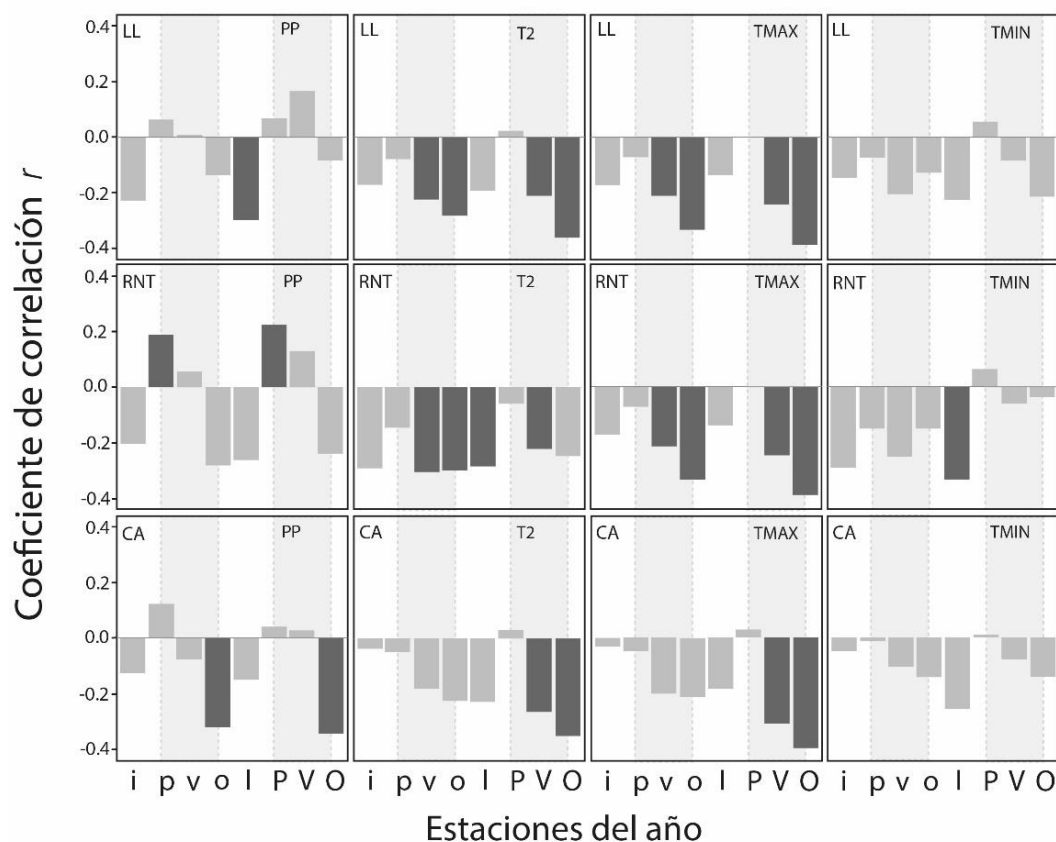


Figura 5: Correlaciones estáticas entre las distintas variables climáticas y las cronologías residuales de cada sitio para el período 1979-2019. Desde arriba hacia abajo se encuentran el sitio húmedo, Lago largo (LL), seguido del méxico Reserva Nacional Trapananda (RNT) y finalmente el sitio seco, Coyhaique alto (CA). El eje x muestra las estaciones del año, I: invierno, P: primavera, V: verano y O: otoño. Las mayúsculas corresponden a las estaciones de la temporada actual de crecimiento, mientras que las minúsculas a las estaciones de la temporada anterior. Las líneas horizontales punteadas representan la temporada anterior de crecimiento mientras que las sólidas la temporada actual. Las barras sólidas de gris oscuro representan una correlación significativa ($p < 0.05$) entre las cronologías residuales y cada una de las variables climáticas, mientras que el gris claro representa correlaciones no significativas. Las variables climáticas se encuentran representadas como PP: precipitación, T2: temperatura media, TMAX: temperatura máxima y TMIN: temperatura mínima.

Para la variable precipitación se encontraron las mayores correlaciones durante la temporada actual de crecimiento (Figura 5). Para el sitio húmedo se encontró una correlación negativa para la época de invierno ($r = -0.3$; $p < 0.05$). En cuanto al sitio méxico, se encontró una correlación positiva con la estación de primavera ($r = 0.24$; $p < 0.05$), y finalmente en el sitio seco se encontró una correlación negativa en la estación de otoño ($r = -0.34$; $p < 0.05$),

siendo esta última la mayor correlación de entre los tres sitios para esta variable. Por otra parte, para la variable temperatura media, únicamente se encontraron correlaciones negativas con las cronologías residuales para los tres sitios, tanto en la temporada actual de crecimiento como en la anterior, principalmente en las estaciones de verano y otoño. Para el sitio húmedo la mayor correlación se encontró en otoño de la temporada actual de crecimiento ($r = -0.36$; $p < 0.05$), para el sitio mésico en verano de la temporada previa de crecimiento ($r = -0.31$; $p < 0.05$) y para el sitio seco se encontró en la época de otoño de la temporada actual de crecimiento ($r = -0.36$; $p < 0.05$). En cuanto a la variable temperatura media máxima, al igual que la variable temperatura media, todas las correlaciones encontradas con las cronologías residuales fueron negativas. Las mayores correlaciones con esta variable se encontraron con la estación de otoño tanto para la temporada actual de crecimiento como para la anterior. Estas correlaciones fueron las más altas encontradas entre las cronologías residuales de cada sitio con alguna de las variables climáticas consideradas para este estudio. Para el sitio húmedo la mayor correlación se encontró para el otoño de la temporada actual de crecimiento ($r = -0.4$; $p < 0.05$), para el sitio mésico esta se encontró para el otoño de la temporada anterior ($r = -0.35$, $p < 0.05$), y para el sitio seco se encontró para el otoño de la temporada actual ($r = -0.4$; $p < 0.05$). Por último, para la variable de temperatura mínima únicamente se encontró una correlación significativa en el sitio mésico para la estación de invierno en la temporada actual de crecimiento ($r = -0.33$, $p < 0.05$).

En cuanto a las correlaciones móviles aplicadas en ventanas de 20 años, en general se encontraron mayores correlaciones que las encontradas al realizar el análisis de correlación estático. Para este análisis se utilizaron las variables de precipitación en las estaciones de otoño y primavera, tanto de la temporada actual de crecimiento como para la anterior, y para la variable temperatura máxima para las estaciones de verano y otoño, también para ambas temporadas de crecimiento. Como se muestra en la Figura 6, en cuanto a la variable de precipitación, en el sitio húmedo se encontraron correlaciones significativas para las estaciones de otoño de la temporada anterior de crecimiento a partir del año 1996, encontrándose la mayor de ellas en el período 1997-2016 ($r = -0.53$, $p < 0.05$). En este sitio también se encontró una correlación positiva con la precipitación de primavera de la temporada de crecimiento anterior durante el período 1998-2017 ($r = 0.43$, $p < 0.05$). En cuanto al sitio mésico se encontraron correlaciones positivas en las estaciones de primavera de la temporada actual de crecimiento en los períodos 1983-2002 ($r = 0.34$, $p < 0.05$), 1990-2009 ($r = 0.29$, $p < 0.05$) y en los últimos períodos a partir del año 1997, encontrándose la mayor correlación de todas en el período 2000-2019 ($r = 0.48$, $p < 0.05$). En el sitio mésico también se encontraron correlaciones negativas con las precipitaciones de la estación de otoño de la temporada actual de crecimiento y de la temporada anterior, para los períodos de 1996-2015 ($r = -0.48$, $p < 0.05$) y 1997-2016 ($r = -0.53$, $p < 0.05$), respectivamente. Por último, para el sitio seco únicamente se encontraron correlaciones negativas entre las cronologías y la precipitación, en ambas estaciones de otoño. En la temporada actual de crecimiento las precipitaciones de otoño fueron significativas únicamente en el período 1983-2002, mientras que en la temporada anterior de crecimiento estas correlaciones son significativas a partir del año 1996, encontrándose la mayor de las correlaciones en el período 1998-2017 ($r = -0.48$, $p < 0.05$).

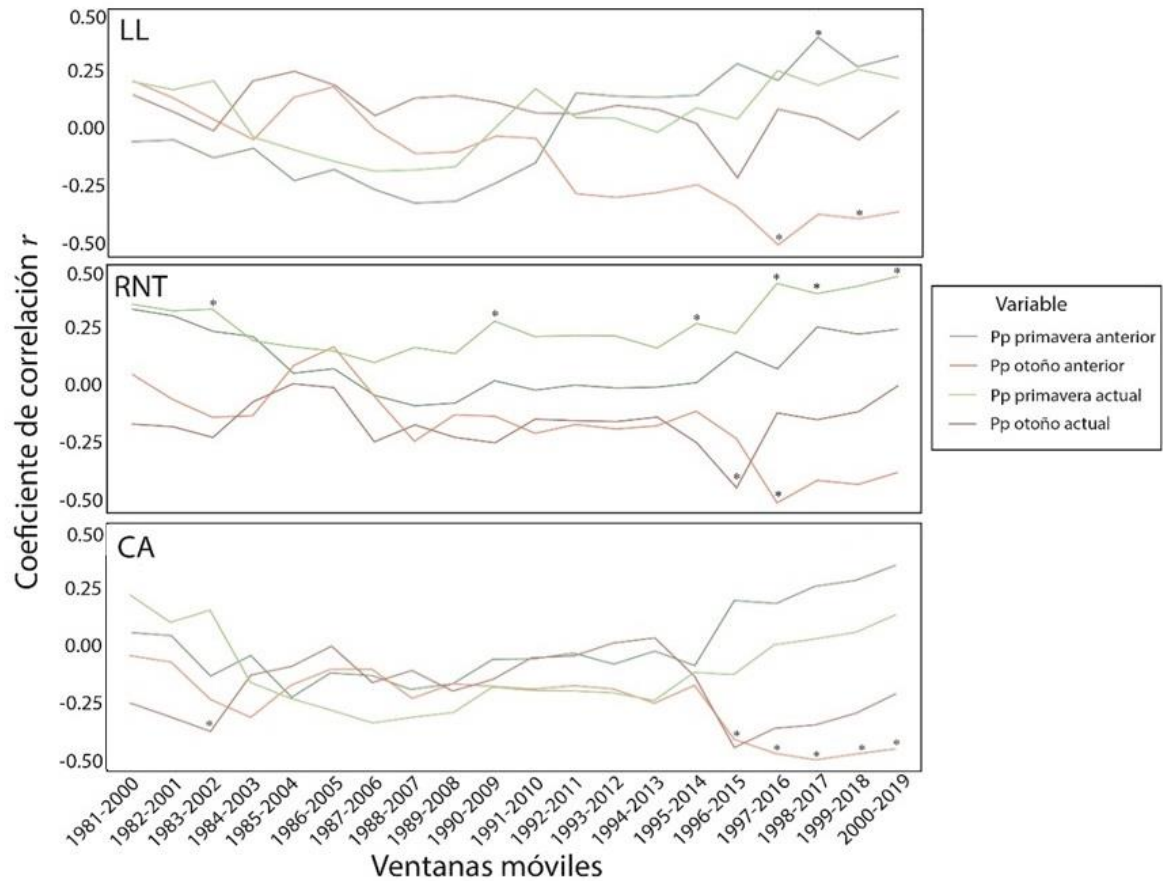


Figura 6: Correlaciones móviles de los Índices de Anchos de Anillo IAA con la variable de precipitación para las estaciones de otoño y primavera. De arriba hacia abajo se encuentra el sitio húmedo, seguido del sitio mésico y finalmente el sitio seco. En el eje de las abscisas se encuentran los períodos de las ventanas móviles de 20 años y en el eje de las ordenadas los coeficientes de correlación r . Los asteriscos (*) sobre cada línea indican aquellos períodos donde las correlaciones entre los IAA y las precipitaciones fueron significativas ($p < 0.05$).

En cuanto a la variable de temperatura máxima, como se muestra en la Figura 7, en el sitio húmedo se encontraron correlaciones negativas entre las cronologías y la temperatura máxima de otoño de la temporada actual de crecimiento. Estas correlaciones negativas alcanzan sus mayores valores en los períodos de 1997-2016 ($r = -0.44$, $p < 0.05$) y 1998-2017 ($r = -0.55$, $p < 0.05$). Sumado a lo anterior, en el sitio húmedo también se encontraron correlaciones significativas con esta variable en la estación de verano previo a la temporada de crecimiento, a partir del año 1995 siendo el período 1998-2017 ($r = -0.4$, $p < 0.05$) en el cual hay una mayor correlación. En cuanto al sitio mésico se encontraron niveles de correlación significativos dentro del último período de análisis móvil 2000-2019, tanto para la estación de otoño de la temporada actual de crecimiento ($r = -0.49$, $p < 0.05$), como para la temporada anterior ($r = -0.46$, $p < 0.05$). Por otra parte, también se encontraron

correlaciones negativas significativas para la estación de verano de la temporada anterior de crecimiento en todas las ventanas móviles a partir del año 1995, siendo la más alta de ellas durante el período 1995-2014 ($r = -0.42$, $p < 0.05$). Finalmente, para el sitio seco se encontraron correlaciones negativas con la variable temperatura máxima con la estación de otoño de la temporada actual de crecimiento para los períodos 1999-2018 ($r = -0.47$, $p < 0.05$) y 2000-2019 ($r = -0.52$, $p < 0.05$). Si bien las correlaciones fueron significativas ($p < 0.05$) entre las cronologías y la variable de temperatura máxima fueron en su mayoría negativas, en los tres sitios también se encontraron correlaciones positivas con esta variable. Tanto para el sitio seco como para el sitio húmedo, estas se encontraron en la estación del verano anterior en el periodo de 1983-2002, siendo estas $r = 0.51$ ($p < 0.05$) y $r = 0.41$ ($p < 0.05$) respectivamente. Por otra parte, también se encontraron correlaciones positivas en la estación de otoño de la temporada anterior de crecimiento en el período 1989-2008 en el sitio seco ($r = 0.37$, $p < 0.05$) y el méxico ($r = 0.32$, $p < 0.05$).

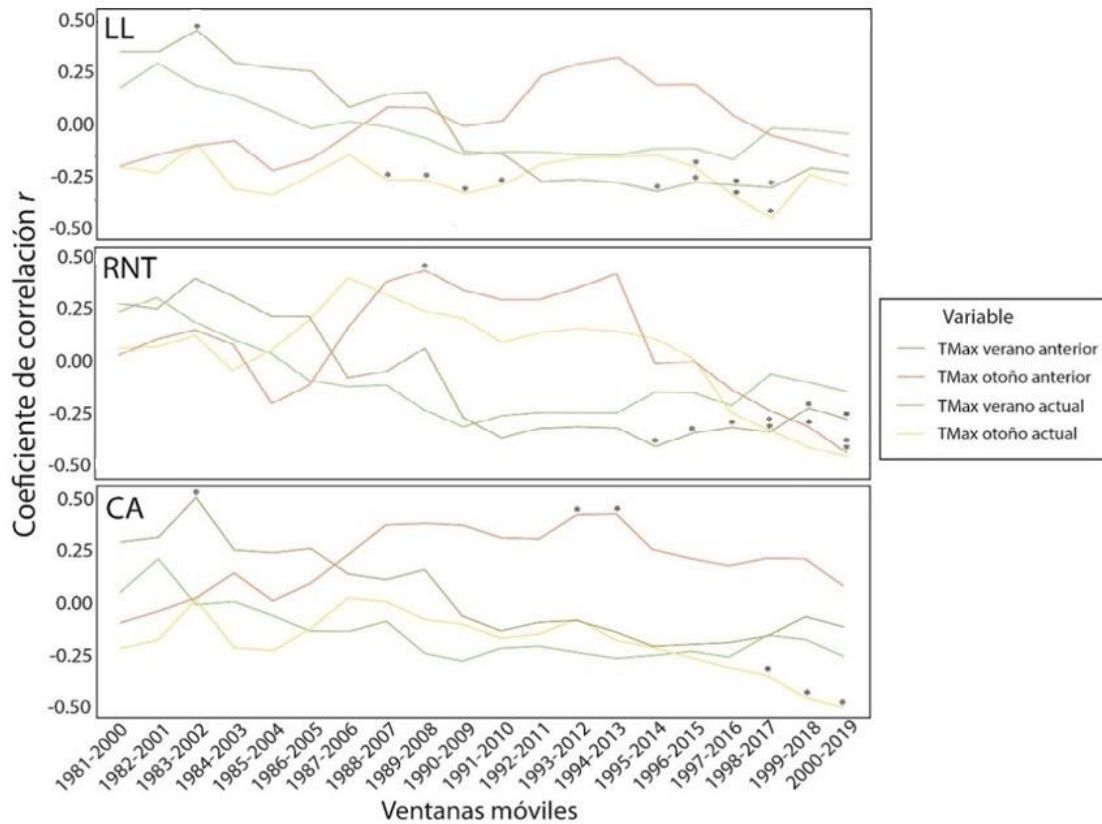


Figura 7: Correlaciones móviles de los Índices de Anchos de Anillo (IAA) con la variable de temperatura máxima para las estaciones de verano y otoño. De arriba hacia abajo se encuentra el sitio húmedo, seguido del sitio méxico y finalmente el sitio seco. En el eje de las abscisas se encuentran los períodos de las ventanas móviles de 20 años y en el eje de las ordenadas los coeficientes de correlación r . Los asteriscos (*) sobre cada línea indican aquellos períodos donde las correlaciones entre los IAA y las temperaturas máximas fueron significativas ($p < 0.05$).

En resumen, las mayores correlaciones entre las cronologías con las variables ambientales de precipitación y temperatura máxima se encontraron a partir del año 1995 en adelante. A partir de este año en la estación de otoño de ambas temporadas de crecimiento, únicamente se encontraron correlaciones negativas entre las cronologías y ambas variables ambientales. Las únicas correlaciones positivas encontradas a partir de este año (1995) se encontraron con la variable de precipitación en la estación de primavera de los sitios mésico y húmedo en las temporadas de crecimiento actual y anterior, respectivamente.

DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos revelan hallazgos significativos para el cumplimiento del objetivo general de este estudio, que corresponde a analizar los patrones de crecimiento en bosques de *Nothofagus pumilio* en un gradiente de precipitación en la Región de Aysén. En cuanto al primer objetivo específico, que fue desarrollar cronologías de crecimiento radial a lo largo de un gradiente de precipitación, los hallazgos más importantes fueron los siguientes: (1) reconocimiento del patrón dominante de crecimiento radial dentro del gradiente de precipitación, en zonas las cuáles no son utilizadas tradicionalmente para este tipo de estudios dendrocronológicos, debido a la evidencia de perturbaciones humanas y al encontrarse en zonas no limitantes para el crecimiento (Aravena *et al.*, 2002). (2) Identificación de años específicos en los cuáles ha habido aumentos o disminuciones importantes del crecimiento radial en los tres sitios dentro del gradiente de precipitación, los cuales están en concordancia con estudios previos realizados no solo para lenga, sino que también para otras especies arbóreas ubicadas en la cordillera de los Andes (Álvarez *et al.*, 2015; Barichivich *et al.*, 2009; Gibson-Carpintero *et al.*, 2022). (3) Reconocimiento de patrones comunes en el crecimiento para los tres sitios a partir de la segunda mitad del siglo XX, en los cuáles se observa un aumento en el crecimiento de los tres sitios desde la década de 1970 hasta la década de 1980, desde la cual comienza una disminución mantenida del crecimiento hasta el final de las tres cronologías (2019), alcanzando valores por debajo de la media a partir del año 2000. Por otra parte, a partir del segundo objetivo específico, determinar la influencia del clima sobre los patrones de crecimiento de *Nothofagus pumilio*, los hallazgos más importantes fueron los siguientes: (1) identificación de las variables climáticas de precipitación en las estaciones de primavera y otoño; y la variable climática de temperatura máxima de las estaciones de verano y otoño como las variables climáticas más influyentes sobre el crecimiento de lenga dentro del gradiente de precipitación. (2) Identificación de un aumento de la influencia de las variables precipitación y temperatura máxima a partir de la década de 1990, especialmente en la estación de otoño, la que fue negativa. Finalmente, en la presente discusión se abordaron las contribuciones de este estudio para posteriores análisis del crecimiento de lenga y recomendaciones para futuras investigaciones en este ámbito.

Reconocimiento del patrón dominante de crecimiento

La cantidad de árboles agrupados por el componente principal 1 (CP1) y los estadísticos descriptivos de las cronologías generadas con estos árboles se contrastan con las cronologías realizadas por Gibson-Carpintero *et al.* (2022) quienes también trabajaron con poblaciones de lenga dentro de la Región de Aysén y agruparon árboles con un análisis de componentes principales (ACP), para seleccionar aquellos que siguen un patrón dominante de crecimiento. El CP1 del estudio anteriormente mencionado agrupó un 83% (128 árboles) del total de árboles utilizados, mientras que el presente estudio agrupó un 63% (97 árboles). Por otra parte, Gibson-Carpintero *et al.* (2022) obtuvieron intercorrelaciones entre series con

valores cercanos a $r = 0.6$, mientras que en el presente estudio las intercorrelaciones entre series fueron similares a $r = 0.5$. Por otra parte, tanto el estudio realizado por Gibson-Carpintero *et al.* (2022) y el presente estudio tienen una sensibilidades medias en los tres sitios cercanas a 0.3 Tanto la diferencia de muestras agrupadas por el CP1 como la mayor intercorrelación entre series se puede explicar por el hecho de que las poblaciones de lenga utilizadas por Gibson-Carpintero *et al.* (2022) se encontraban en zonas las cuales se consideran más limitantes para el crecimiento, al estar más cercanas al límite altitudinal arbóreo (995, 1145 y 1104 m. s. n. m.), que contrastan con las poblaciones de lenga utilizadas en el presente estudio (sitio húmedo con 940 m.s.n.m., sitio mésico con 950 m.s.n.m. y sitio seco con 1050 m.s.n.m.), las que al encontrarse en zonas de bosque y en condiciones con mayor disponibilidad de recursos, por lo tanto menos limitantes para el crecimiento arbóreo, se asume que estarían potencialmente influenciadas por otros factores que no son exclusivamente climáticos, como la disponibilidad de nutrientes en el suelo, la competencia por luz y espacio, así como la variabilidad en las características locales del suelo (Aravena *et al.*, 2002; Camarero *et al.*, 2013). Por otra parte, la selección de árboles en el presente estudio se realizó mediante el método de selección individual BDq, con el que se seleccionan árboles de todas (o la mayoría) de clases diamétricas presentes en el rodal, siendo este el único requisito de colecta, mientras que en otros estudios realizados para el análisis de la influencia climática sobre el crecimiento de lenga, como lo es el realizado por Álvarez *et al.* (2015) y también en el estudio realizado por Gibson-Carpintero *et al.* (2022), se seleccionan árboles que se encuentren en buenas condiciones sanitarias, que tengan un diámetro mayor a 25 cm y que tengan una posición dominante en el dosel, esto con el fin de asegurar que su crecimiento está influenciado principalmente por el clima. A pesar de todo lo mencionado anteriormente, el hecho de que la intercorrelación entre series de las cronologías del presente estudio sea cercana a $r = 0.5$ y que la sensibilidad media de estas es cercana a 0.3, indica que el crecimiento de los árboles agrupados por una alta correlación con el CP1 ($r \geq 0.45$), siguen patrones comunes y que los anillos de crecimiento no poseen una gran variabilidad año a año. Valores similares de ambos estadísticos en diversos estudios dendrocronológicos (e.j. Álvarez *et al.*, 2015; Lara *et al.*, 2001; Lara *et al.*, 2005) se asocian generalmente a que el crecimiento radial de los árboles se encuentra influenciado principalmente por el clima local, el cuál en este caso en particular está determinado por las variaciones en las precipitaciones dentro del gradiente longitudinal (Fritts y Swetnam, 1989).

Identificación de años específicos de aumento y disminución del crecimiento

En los años 1900 y 1949 (Figura 3) se encontró una disminución considerable del crecimiento en los tres sitios, las cuales coinciden con lo encontrado por Gibson-Carpintero *et al.* (2022) en el límite altitudinal arbóreo de los Andes Patagónicos de la región de Aysén. Ambas disminuciones fueron marcadas en el crecimiento radial de los tres sitios, los cuales coinciden con periodos calurosos registrados en la Patagonia norte, según la reconstrucción de la temperatura realizada por Villalba *et al.* (2003). Estos periodos de calor intenso comienzan un año anterior a las disminuciones comunes en el crecimiento radial (1900 y 1949), lo que se puede explicar debido a que el crecimiento de un año en específico se

encuentra influenciado por las condiciones climáticas del año actual como del año anterior (Cook y Kairiutskis, 1990; Fritts, 1976). Por otro lado, se encontró que el año 1976 hubo un aumento considerable en el crecimiento radial de los tres sitios, el cual se ha evidenciado en variadas cronologías de anchos de anillos a lo largo de la cordillera de los Andes, y no solamente para lenga (Álvarez *et al.*, 2015; Barichivich *et al.*, 2009; Garreaud *et al.*, 2009; Serrano-León y Christie, 2020; Villalba *et al.*, 1997). Este aumento generalizado en el crecimiento de especies arbóreas se asocia principalmente al ya documentado aumento de temperaturas en la superficie del Océano Pacífico el año 1976, lo que fue favorable para el crecimiento de las especies arbóreas de la cordillera de los Andes (Barichivich *et al.*, 2009; Garreaud *et al.*, 2009). Por otra parte, en el sitio méxico se encontraron dos disminuciones importantes en el crecimiento en los años 2014 y 2016, las cuáles son las mayores encontradas dentro de todo el gradiente de precipitación. Estas disminuciones en el crecimiento están asociadas a eventos de defoliaciones masivas provocadas por *Omiscodes amphimone* ocurridas en los bosques de lenga en la Región de Aysén, las que se han hecho más frecuentes a partir del año 2000, en concordancia con el aumento en las temperaturas e intensidad de las de sequías durante la temporada de crecimiento de lenga (Gutiérrez *et al.*, 2020).

Reconocimiento de patrones comunes del crecimiento radial

Desde mediados de la década de 1970, específicamente en el año 1976, se encontró un patrón de aumento en el crecimiento radial de manera mantenida en los tres sitios dentro del gradiente de precipitación, el que se mantiene constante hasta mediados de la década de 1980. Este aumento generalizado en el crecimiento de especies arbóreas se asocia principalmente al cambio en la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) a una fase positiva (cálida) a partir en el año 1976 y se mantiene constante hasta mediados de la década de los 90 (Barichivich *et al.*, 2009; Garreaud *et al.*, 2009; Gibson-Carpintero *et al.*, 2022; Ramírez y Curiel, 2015). PDO corresponde a una forzante climática de gran escala que fluctúa entre fases positivas (cálidas) y negativas (frías) cada 20 o 30 años aproximadamente (Mantua *et al.*, 1997). La fase positiva (cálida) de PDO se caracteriza por generar un aumento en la temperatura superficial del océano Pacífico, lo cual se traduce en un aumento de las precipitaciones y las temperaturas del aire continentales en la zona de los Andes Patagónicos, lo que generó un aumento generalizado en las especies arbóreas de esta zona (Garreaud *et al.*, 2009). Este patrón de aumento mantenido en el crecimiento de lenga se ha evidenciado en variadas cronologías dentro de su distribución (Álvarez *et al.*, 2015; Gibson-Carpintero *et al.*, 2022; Serrano-León y Christie, 2020). A partir del año 1985, se evidenció una disminución mantenida en el crecimiento hasta el año 2019, la que a partir del año 2000 alcanza valores por debajo de la media del período completo de las cronologías (1900-2019). Este patrón de crecimiento negativo se ha observado también en múltiples cronologías de lenga y se ha asociado principalmente al efecto de la tendencia cada vez más positiva de la Oscilación Antártica (AAO), la cual se ha registrado a partir de finales de la década de 1950 y, a la mayor frecuencia de eventos de “El Niño” (fase positiva de El Niño-Oscilación del Sur, ENSO) (Álvarez *et al.*, 2015; Garreaud *et al.*, 2009; Serrano-León y Christie, 2020). AAO corresponde a una forzante climática de gran escala la que, en los

Andes Patagónicos, en su fase positiva está asociada a aumento de las temperaturas y a disminuciones en las precipitaciones (Garreaud *et al.*, 2009; Wolter, 1987). ENSO por su parte corresponde a un fenómeno climático que ocurre con una frecuencia entre 2 a 7 años, y en los Andes Patagónicos se caracteriza por una disminución de las precipitaciones y un aumento de las temperaturas en las estaciones de primavera y verano, las cuales corresponden también a las temporadas de crecimiento de lenga (Garreaud *et al.*, 2009; Olivares *et al.*, 2019; Zambrano, 1986). Al igual que los patrones de aumento en el crecimiento, el patrón de disminución de este es concordante con la tendencia de crecimiento para el período 1979-2019, obtenida a partir de los modelos de regresión lineal aplicados sobre los IAA de cada uno de los sitios. Fajardo *et al.* (2019) han observado la tendencia de crecimiento de lenga en distintas zonas de su distribución, y en las cronologías realizadas en Coyhaique, cercano a los tres sitios del presente estudio, ellos han encontrado una tendencia de disminución marcada en el crecimiento para el período 1980-2012, lo cual está en sincronía con la tendencia negativa encontrada en el presente estudio, para el período completo de 1979-2019.

Identificación de las variables climáticas con mayor influencia

A partir del análisis de correlación estática entre los Índices de Anchos de Anillos (IAA) y las variables climáticas locales, se encontraron correlaciones positivas entre la cronología del sitio mésico con las precipitaciones de las estaciones de primavera, tanto para la temporada actual de crecimiento como la anterior, lo que se puede explicar debido a una mayor disponibilidad de agua durante la época de crecimiento de lenga. Este resultado se contrapone con las señales climáticas del crecimiento de lenga encontradas en otros estudios (Álvarez *et al.*, 2015, Gibson-Carpintero *et al.*, 2022), donde la correlación entre el crecimiento con la precipitación de la estación de primavera es negativa. Ambos estudios interpretan este resultado como una señal de acumulación de precipitaciones que, generalmente son en forma de nieve en zonas cercanas al límite arbóreo, sin embargo, esto no ocurre en el sitio mésico del presente estudio, ya que este no se encuentra cercano al límite altitudinal arbóreo, sino que en la zona de sub-montaña. Por otra parte, la correlación entre la cronología del sitio seco y las precipitaciones son negativas, pero, para la estación de otoño de ambas temporadas de crecimiento. Al igual que lo señalado por Álvarez *et al.* (2015) esto podría explicarse por la caída de precipitación en forma de nieve, pero el hecho que esto ocurra en la época de otoño coincide con el fin de la temporada de crecimiento de lenga, especie que al igual que la mayoría de las especies de los bosques templados, durante el otoño comienza el período de dormancia debido a la estacionalidad templada, el que comienza al inicio de esta estación (marzo) hasta detenerse completamente durante el mes de mayo aproximadamente (González *et al.*, 2006; Gutiérrez, 2009). Por su parte en el sitio húmedo se encontraron correlaciones negativas con esta variable en la estación de invierno, en la cual el crecimiento de lenga se encuentra detenido (Álvarez *et al.* 2015; González *et al.*, 2006). Por otro lado, también se encontraron correlaciones negativas con las temperaturas en general, destacando las correlaciones negativas con la temperatura máxima de otoño y verano. Esto también coincide con lo planteado por Fajardo *et al.* (2019) y por Gibson-Carpintero *et al.* (2022), quienes han documentado estas correlaciones negativas

entre el crecimiento de lenga y la temperatura máxima, en la estación de otoño.

Aumento de la influencia de variables climáticas desde la década de 1990

Ya conocidas las variables climáticas que poseen mayor influencia sobre el crecimiento de lenga en los tres sitios, mediante el análisis de correlaciones móviles se demuestra que la influencia de ambas variables (precipitación y temperatura máxima) se ha incrementado en los tres sitios dentro del gradiente de precipitación a partir de la década de 1990. En cuanto a las precipitaciones, Gibson-Carpintero *et al.* (2022) y Rodríguez-Catón *et al.* (2016) al igual que en el presente estudio, demuestran una influencia positiva de la variable de precipitación para la estación de primavera, sin embargo; en el presente estudio esta es positiva únicamente en los sitios mésico y húmedo a partir de la década de 1990, siendo significativa a medida que se acerca el final de ambas cronologías (año 2019). Rodríguez-Catón *et al.* (2016) afirman que la mayor influencia de las precipitaciones en el crecimiento a partir de la década de 1980 es debido a la disminución generalizada de estas mismas. Al disminuir las precipitaciones, disminuye la disponibilidad de agua en el suelo, generando una mayor dependencia de los individuos de lenga a este recurso, lo que genera una mayor sensibilidad del crecimiento a las variaciones en las precipitaciones (Fajardo *et al.*, 2019). Por otra parte, a diferencia de lo documentado por Gibson-Carpintero *et al.* (2022) y Rodríguez-Catón (2016), en el presente estudio se observa una influencia negativa de las precipitaciones en la estación de otoño a partir de la década de 1990, principalmente en el sitio seco, lo cual se asemeja a lo documentado por Lara *et al.* (2005) en poblaciones de lenga ubicadas en la zona de la Patagonia sur. En cuanto a la variable de temperatura máxima, la influencia negativa de esta a partir de la década de 1980 se ha documentado en múltiples estudios realizados sobre Lenga (Fajardo *et al.*, 2019; Gibson-Carpintero *et al.*, 2022; Rodríguez-Catón *et al.*, 2016). Según Fajardo *et al.* (2019) esto se contradice con la teoría sobre el aumento de las temperaturas sería favorable para el crecimiento en especies arbóreas de climas fríos, ya que este aumento ha estado acompañado de sequías producto de la fase positiva de la AAO y a la mayor frecuencia de eventos de “El Niño” (Álvarez *et al.*, 2015; Fajardo *et al.*, 2019; Lavergne *et al.*, 2015; Rodríguez-Catón *et al.*, 2016). Esta influencia negativa de la temperatura máxima no solo se ha observado en poblaciones de lenga dentro de la región de Aysén, sino que también en múltiples poblaciones de especie a lo largo y ancho de su distribución (Álvarez *et al.*, 2015; Fajardo *et al.*, 2019; Lavergne *et al.*, 2015; Rodríguez-Catón *et al.*, 2016).

Contribuciones y recomendaciones para futuras investigaciones

El presente estudio aporta conocimientos sobre de los patrones de crecimiento de lenga dentro del gradiente longitudinal de su distribución (i.e. gradiente de precipitaciones), ya que la mayoría de los estudios realizados para esta especie han considerado el gradiente latitudinal a largo de su distribución natural (i.e. gradiente de temperatura), sin embargo; aquí se dan a conocer de manera detallada los patrones de crecimiento, las tendencias de este, las variables climáticas que mayor influencia tienen sobre estos patrones, y a partir de

qué años estas son más influyentes en el crecimiento. El gradiente longitudinal de la distribución de lenga ha sido poco estudiado y, en la región de Aysén se caracteriza por notorias variaciones en las precipitaciones, lo que genera variaciones en la estructura y dinámica de estos ecosistemas forestales de la región (Soto *et al.*, 2022; Stolpe y Hepp, 2014). El presente estudio también genera un aporte a la disciplina misma de la dendrocronología, ya que el uso de poblaciones de lenga ubicadas en sitios de los cuales muestran evidencias de perturbaciones humanas, hecho que dificulta los análisis del crecimiento de esta especie debido a factores ambientales, amplía considerablemente este tipo de aplicaciones de la disciplina. Por otra parte, el presente estudio demuestra que los efectos del cambio climático, con el cuál se espera una disminución en las precipitaciones y un aumento de las temperaturas en toda la zona de la Patagonia oeste (Olivares *et al.*, 2019), han tenido efectos en la disminución del crecimiento, el cuál ha sido documentado por múltiples estudios, sin embargo, generalmente en zonas más cercanas al límite altitudinal arbóreo, con lo cual el presente estudio se considera un aporte para el conocimiento de este efecto generalizado del cambio climático sobre los bosques, ya que la zona de la sub-montaña no se ha visto exenta de estos efectos (Fajardo *et al.*, 2019; Olivares *et al.*, 2019). Como recomendaciones para futuros estudios en este ámbito, se propone el uso de otras variables climáticas, o bien el uso de índices que demuestren el efecto conjunto de ambas variables climáticas, los cuáles no se utilizaron en el presente estudio debido a la baja resolución espacial que estos tienen (i.e. Índice de Sequía de Palmer, SPEI), y que no son capaces de demostrar sus efectos en estos sitios tan cercanos. También se propone la exploración más detallada de datos climáticos ya que en zonas como la Región de Aysén, es muy común la ocurrencia de precipitaciones en forma de nieve, por lo que estas no están disponibles para el uso de las distintas especies forestales (Álvarez *et al.*, 2015; Stolpe y Hepp, 2014). Por otra parte, también se propone la exploración y análisis de otras tendencias dominantes de crecimiento, como lo podría ser las representadas por los componentes principales 2 (CP2) y/o 3 (CP3), lo cual se ha realizado en otros estudios acerca del análisis de crecimiento de lenga como lo han propuesto Lara *et al.* (2005), Rodríguez-Catón *et al.* (2015) y Serrano-León y Christie (2020). Lo anteriormente mencionado no se realizó en el presente estudio ya que se buscaba reconocer el patrón dominante de crecimiento dentro del gradiente de precipitación, el cual está representado por el componente principal 1 (CP1), ya que es el que contiene la mayor parte de la varianza común de las series individuales de crecimiento. Finalmente se propone la exploración de los efectos sobre el crecimiento de lenga, de variables propias de los sitios, como lo son la estructura, variables y factores asociadas al suelo.

CONCLUSIONES

En el presente estudio, fue posible generar cronologías de anchos de anillos, con aquellos árboles que siguen patrones de crecimiento dominantes dentro del gradiente de precipitación presente en la Región de Aysén. Gracias a la utilización del análisis de componentes principales (ACP) fue posible agrupar aquellos árboles que se ven mayormente influidos por el clima local en cada uno de los sitios, determinado por las variaciones dentro del gradiente de precipitación, a pesar de que en ellos existe evidencia de perturbaciones producidas por actividad humana, lo que representa un desafío al momento de caracterizar y/o aislar los efectos del clima en el crecimiento de alguna especie forestal.

En estas cronologías de anchos de anillos se encontraron patrones diferenciados y comunes del crecimiento de lenga, dentro del gradiente de precipitación, aumentando así el conocimiento que tenemos de esta especie, el cuál ha sido enfocado generalmente a gradientes de temperatura a lo largo de su distribución natural. Las correlaciones entre los patrón de crecimiento con las variables climáticas nos dan a conocer cuáles de estas son las que tienen mayores influencias en el crecimiento, y por su parte las correlaciones móviles nos demuestran a partir de qué años o bien en que períodos estas variables han influido de menor o mayor manera en el crecimiento de lenga en cada sitio, lo que nos da cuenta sobre los efectos del cambio climático, el cual ha tenido efectos generalizados a lo largo y ancho de toda la distribución de lenga, incluso en estas zonas, que han sido poco estudiadas.

Las proyecciones climáticas futuras, que sugieren un aumento de las temperaturas y cambios en los patrones de precipitación en los Andes Patagónicos, destacan la importancia de continuar investigando las dinámicas de crecimiento de lenga y su respuesta al cambio climático. En este sentido, este estudio representa un aporte significativo al conocimiento de los bosques dominados por lenga en la Región de Aysén.

BIBLIOGRAFÍA

Álvarez, C., T. T. Veblen, D. A. Christie, y Á. González-Reyes. 2015. Relationships between Climate Variability and Radial Growth of *Nothofagus pumilio* near Altitudinal Treeline in the Andes of Northern Patagonia, Chile. *Forest Ecology and Management*, 342, 112-21.

Barichivich, J., D. J. Sauchyn y A. Lara. 2009. Climate signals in high elevation tree-rings from the semiarid Andes of north-central Chile: responses to regional and large-scale variability. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 281 (2009), 320-333.

Bunn, A. G. 2008. A Dendrochronology Program Library in R (dplR). *Dendrochronologia* 26.

Bunn, A. G. 2010. Statistical and Visual Crossdating in R Using the dplR Library. *Dendrochronologia*, 28, 251-8.

Bunn, A. G., M. Korpela, F. Biondi, F. Campelo, P. Mérian, F. Qeadan y C. Zang. 2019. dplR: Dendrochronology Program Library in R. R package version 1.7.0.

Briffa, K. R. 1995. Interpreting high-resolution proxyclimate data - the example of dendroclimatology. Pages 77-94 in H. Von Storch and A. Navarra (eds.). *Analysis of climate variability, applications of statistical techniques*. Springer, Berlin, Germany

Camarero, J. J., A. Gazol, G. Sangüesa-Barreda, J. Oliva y S. M. Vicente-Serrano. 2015. To die or not to die: early warnings of tree dieback in response to a severe drought. *Journal of Ecology*, 103, 44-57.

Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2). 2019. Productos grillados. Obtenido de <https://www.cr2.cl/datos-productos-grillados/>

Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN). 2005. Estudio agrologico XI Región: descripciones de suelos, materiales y símbolos., CIREN N°13. ed. Centro de información de recursos naturales, Santiago.

Cook, E. R. y L. A. Kairiukstis. (Eds.). 1990. *Methods of Dendrochronology: Applications in the Environmental Sciences*. Springer. ISBN-13: 97-0-7923-0586-6.

Donoso, C. 1981. Tipos forestales de los bosques nativos de Chile. CONAF-PNDU-FAO. Documento de Trabajo, 38, 1-70.

Donoso, C. 1993. Bosques templados de Chile y Argentina: variación, estructura y

dinámica. Universitaria, Santiago, Chile.

Essenwanger, O. 1986. Elements of statistical analysis. World survey of climatology, Vol. 1B. Elsevier, Amsterdam, the Netherlands.

Fajardo, A., A. Gazol, C. Mayr y J. J. Camarero. 2019. Recent decadal drought reverts warming-triggered growth enhancement in contrasting climates in the Southern Andes tree line. *Journal of Biogeography*, 46, 1367–79.

Fritts, H. C. (1976). *Tree Rings and Climate*. London, Academic Press: 567p.

Fritts H. C. y T. W. Swetnam. 1989. Dendroecology: a tool for evaluating variations in past and present forest environments. *Advances in ecological research*, 19, pp. 111-188.

Garreaud, R. D., M. Vuille, R. Compagnucci y J. Marengo. 2009. Present-day South American climate. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 281(3-4), 180-195.

Gallardo, V. B., M. A. Hadad, F. A. Roig, G. Gatica y F. Cheng. 2024. Spatio-temporal linkage variations between NDVI and tree rings on the leeward side of the northern Patagonian Andes. *Forest Ecology and Management*, 553(2024), 121593.

Gibson-Carpintero, S., A. Venegas-González, V. D. Urrea, S. A. Estay y A. G. Gutiérrez. 2022. Recent increase in autumn temperature has stabilized tree growth in forest near the tree lines in Chilean Patagonia. *Ecosphere*, 13, e4266.

Guldin, J. M. 1991. Technical commentary: Uneven-aged BDq regulation of Sierra Nevada mixed conifers 1. *Western Journal of Applied Forestry*, 6(2), 27-32.

Hildebrand-Vogel, R., R. Godoy y A. Vogel. 1990. Subantarctic-andean *Nothofagus pumilio* forests. *Vegetation*, 89(1), 55-68.

Holmes, R. L. 1982. Computer-assisted quality control in tree ring dating and measuring. *Tree-Ring Bulletin* 43: 69-78.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2018. Summary for Policymakers. En: *Global Warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty*.

LaMarche, V.C. 1974. Paleoclimatic inferences from long tree-ring records. Intersite comparison shows climatic anomalies that may be linked to features of the general circulation. *Science*, 184(4129), 1043-1048.

Lara, A., J. C. Aravena, R. Villalba, A. Wolodarsky-Franke, B. Luckman y R. Wilson. 2001. Dendroclimatology of high-elevation *Nothofagus pumilio* forest at their northern

- distribution limit in the central Andes of Chile. *Canadian Journal of Forest Research*, 31(2001), 925-936.
- Lara, A., R. Villalba, A. Wolodarsky-Franke, J. C. Aravena, B. Luckman y E. Cuq. 2005. Spatial and temporal variation on *Nothofagus pumilio* growth at tree line along its latitudinal range (35 40'- 55 S) in the Chilean Andes. *Journal of Biogeography*, 32(5), 879-893.
- López-Wiederhold, A. 2024. Evaluación de cortas de selección individual sobre la estructura y el crecimiento de bosques adultos de lenga (*Nothofagus pumilio* (Poepp et Endl.) Krasser) en la región de Aysén. (Tesis de pregrado, Universidad de Aysén).
- Massaccesi, G., F. A. Roig, G. Martínez-Pastur y M. D. Barrera. 2008. Growth patterns of *Nothofagus pumilio* trees along altitudinal gradients in Tierra del Fuego, Argentina. *Trees* 22(2), 245-255.
- Marquis, D. A. 1978. Application of free selection in mixed forests of the inland northwestern United States. *Forest Ecology and Management*, 209, 131-145.
- Martínez-Pastur, G., P. Peri, R. Vukasovic, S. Vaccaro y V. Piriz Carrillo. 1997. Site index equation for *Nothofagus pumilio* Patagonian forest. *Phyton* 6, 55-60.
- Olivares-Contreras, V. A., C. Mattar, A. G. Gutiérrez, y J. C. Jiménez. 2019. Warming trends in Patagonian subantarctic forest. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 76, 51-65.
- Pisano, E. 1977. Fitogeografía de Fuego - Patagonia chilena. I.- Comunidades vegetales entre las latitudes 52 y 56 S. *An. del Inst. la Patagon*. 121-250.
- R Core Team. 2018. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- Rodríguez-Catón, M., R. Villalba, A. M. Srur, y B. Luckman. 2015. Long-term trends in radial growth associated with *Nothofagus pumilio* forest decline in Patagonia: integrating local into regional scale patterns. *Forest Ecology and Management*, 339, 44-56.
- Rodríguez-Catón, M., R. Villalba, M. Morales y A. M. Srur. 2016. Influence of droughts on *Nothofagus pumilio* forest decline across northern Patagonia, Argentina. *Ecosphere*, 7(7), e01390.
- RStudio Team. 2018. RStudio: Integrated Development for R. RStudio, Inc., Boston, MA URL <http://www.rstudio.com/>.
- Schneider, C. y D. Gies. 2004. Effects of El Niño-Southern Oscillation on southernmost South America precipitation at 53°S revealed from NCEP-NCAR reanalyses and weather station data. *International Journal of Climatology*, 24: 1057-1076.

- Schulman, E. 1956. Dendroclimatic changes in semiarid America. University of Arizona Press.
- Serrano-León, H., y D. A. Christie. 2020. Tree-Growth at the Rear Edge of a *Nothofagus pumilio* Andean Forest from Northern Patagonia Show Different Patterns and a Decline in the Common Signal during the Last Century. *Forest Ecology and Management*, 475, 118426.
- Soto, D. P., C. Salas-Eljatib, P. J. Donoso, Á. Hernández-Moreno, D. Seidel y A. W. D'Amato. 2021. Impacts of varying precipitation regimes upon the structure, spatial patterns, and productivity of *Nothofagus pumilio*-dominated old-growth forests in Patagonia. *Forest Ecology and Management*, 524 (2022), 120519.
- Soto, D. P., P. J. Donoso, C. Zamorano-Elgueta, A. I. Ríos y A. Promis. 2021. Precipitation declines influence the undersoty patterns in *Nothofagus pumilio* old-growth forests in northwestern Patagonia. *Forest Ecology and Management*, 491(2021), 119169.
- Srur, A. M., R. Villalba, P. E. Villagra y D. Hertel. 2008. Influencias de las variacione en el clima y en la concentración de CO₂ sobre el crecimiento de *Nothofagus pumilio* en la Patagonia. *Revista Chilena de Historia Natural*, 81: 239-256.
- Stokes, M. A. y T. L. Smiley. 1968. An introduction to tree-ring dating. Chicago: University of Chicago Press.
- Stolpe, N. B. y C. Hepp. 2014. Caracterización taxonómica de los suelos de los valles de interés agropecuario de la región de Aysén (Patagonia occidental-chile), Boletín IN. ed. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Coyhaique
- Wigley, T. M. L., K. R. Briffa, y P. D. Jones. 1984. On the average value of correlated time series, with applications in dendroclimatology and hydro-meteorology. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 23, 201-213.
- Wolter, K. 1987. The Southern Oscillation in surface circulation and climate over the tropical Atlantic, Eastern Pacific and Indian Oceans as captured by cluster analysis. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 26(4), 540-558.
- Zambrano, E. 1986. El Fenómeno de “El Niño” y la Oscilación Sur (ENSO). *Acta Oceanográfica del Pacífico* 3(1): 195-203.
- Zang, C. y F. Biondi. 2013. Dendroclimatic calibration in R: The bootRes package for response and correlation function analysis. *Dendrochronologia* 31, 68-74.
- Zhang, W., T. Zhao, X. Su, B. Wu, Z. Min y Y. Tian. 2021. A Tree Ring measurement method based on error correction in digital image of stem analysis disk. *Forests*, 12 (4), 464-483.

Memoria de titulo final - Jose Velasquez-firmado

Final Audit Report

2024-08-13

Created:	2024-08-13
By:	Jose Velasquez Gonzalez (jose.mvel@gmail.com)
Status:	Signed
Transaction ID:	CBJCHBCAABAACt8hx45MY-4jHsAKfdluFyyixlZbVpG7

"Memoria de titulo final - Jose Velasquez-firmado" History

-  Document digitally presigned by Gabriela Olga Lankin Vega (glankin@uchile.cl)
2024-08-09 - 6:47:58 PM GMT
-  Document created by Jose Velasquez Gonzalez (jose.mvel@gmail.com)
2024-08-13 - 10:24:59 PM GMT
-  Document emailed to m.galleguillos@uai.cl for signature
2024-08-13 - 10:26:46 PM GMT
-  Email viewed by m.galleguillos@uai.cl
2024-08-13 - 10:27:48 PM GMT
-  Signer m.galleguillos@uai.cl entered name at signing as Mauricio Galleguillos
2024-08-13 - 10:28:30 PM GMT
-  Document e-signed by Mauricio Galleguillos (m.galleguillos@uai.cl)
Signature Date: 2024-08-13 - 10:28:32 PM GMT - Time Source: server
-  Agreement completed.
2024-08-13 - 10:28:32 PM GMT