



Universidad Austral de Chile

Facultad de Ciencias Forestales y Recursos Naturales

**Cronologías flotantes de ancho de anillos de *Nothofagus betuloides* y *Nothofagus pumilio* en Lago Fagnano, Isla Grande Tierra del Fuego, Región de Magallanes**

Patrocinante: Sr. Claudio Álvarez P.

Co-patrocinante: Sr. Duncan Christie B.

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

**NICOLÁS BENJAMÍN SEGOVIA SÁNCHEZ**

VALDIVIA

2026

	Índice de materias	Página
i	Calificación del Comité de Titulación	i
ii	RESUMEN	ii
1.	INTRODUCCIÓN	1
2.	METODOLOGÍA	4
2.1.	Área de estudio	4
2.2.	Especies en estudio	6
2.3.	Colecta y procesamiento de muestras	8
2.4.	Fecha y medición de los anillos de crecimiento	9
2.5.	Construcción de la cronología de ancho de anillo	10
2.6.	Relación con otros registros multicentenarios de <i>N. betuloides</i> y <i>N. pumilio</i> de la región de estudio	11
3.	RESULTADOS	12
3.1.	Desarrollo de las cronologías de ancho de anillos de <i>N. betuloides</i> y <i>N. pumilio</i>	12
3.2.	Análisis de Wavelet para <i>N. betuloides</i> y <i>N. pumilio</i>	18
3.3.	Relación entre el Atlas de Sequías de Sudamérica (SADA) y las cronologías de las especies estudiadas	19
3.4.	Comparación de la cronología de ancho de anillo de <i>N. betuloides</i> sitio Lago Fagnano con cronología sitio Lago Róbal, Isla Navarino	20
3.5.	Comparación de la cronología de ancho de anillo de <i>N. pumilio</i> sitio Lago Fagnano con cronología regional.	21
4.	DISCUSIÓN	23
4.1.	Construcción de las cronologías flotantes	23
4.2.	Comparación entre las cronologías flotantes de Lago Fagnano y cronologías regionales	26
5.	CONCLUSIONES	28
6.	REFERENCIAS	28
Anexos	1. Estadísticos descriptivos cronología de ancho de anillo <i>N. betuloides</i>	
	2. Estadísticos descriptivos cronología de ancho de anillo <i>N. pumilio</i>	

## Calificación del Comité de Titulación

		<b>Nota</b>
<b>Patrocinante:</b>	<b>Sr. Claudio Álvarez Pacheco</b>	<b><u>7.0</u></b>
<b>Co-patrocinante:</b>	<b>Sr. Duncan Christie Brown</b>	<b><u>7.0</u></b>
<b>Informante:</b>	<b>Sr. Manuel Suazo Álvarez</b>	<b><u>7.0</u></b>
<b>Informante:</b>	<b>Sr. Kevin Sharp Riffo</b>	<b><u>7.0</u></b>

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



---

**Sr. Claudio Álvarez Pacheco**

## RESUMEN

El estudio de la variabilidad climática de largo plazo en la Patagonia austral es limitado por la extensión temporal de las cronologías construidas a partir de árboles vivos. En este contexto, el uso de madera relicta proveniente de árboles muertos representa una oportunidad para fortalecer y ampliar los registros existentes mediante el desarrollo de cronologías flotantes. *Nothofagus betuloides* y *N. pumilio* son especies endémicas y longevas presentes en la Patagonia austral, con una alta sensibilidad a las variaciones climáticas, lo que las convierte en archivos naturales valiosos para estudios paleoambientales. El objetivo de esta investigación fue evaluar el potencial dendrocronológico de la madera relicta para la construcción de cronologías flotantes de ancho de anillos en el sector de Lago Fagnano, Isla Grande de Tierra del Fuego.

Se procesaron rodajas de madera subfósil provenientes de 41 individuos muertos, aplicando técnicas dendrocronológicas estándar considerando fechado, medición y cofechado de las muestras. A partir de las series validadas se desarrollaron cronologías flotantes, abarcando los periodos 1592-2013 para *N. betuloides* y 1610-2005 para *N. pumilio*, con 93% de muestras cofechadas y altos valores de intercorrelación entre series. El análisis de wavelet reveló diferencias en la estructura temporal del crecimiento, destacando en *N. pumilio* la persistencia de un ciclo cercano a los 7 años. Las comparaciones con cronologías existentes evidenciaron una señal común robusta en los patrones de crecimiento radial en ambas especies. En conjunto, los resultados confirman que la madera relicta conserva de manera consistente la señal climática, respaldando su uso como registro paleoambiental confiable en la Patagonia austral.

**Palabras clave:** Cronología flotante, madera subfósil, *Nothofagus betuloides*, *Nothofagus pumilio*, dendrocronología.

## 1. INTRODUCCIÓN

El estudio de la variabilidad ambiental y climática de largo plazo en los bosques del extremo austral de Sudamérica requiere de registros dendrocronológicos que abarquen intervalos temporales extensos y continuos. Para ello, se desarrollan cronologías de ancho de anillos a partir de testigos de árboles vivos, sin embargo, estas presentan una limitación inherente asociada a la duración del ciclo de vida de los individuos, lo que restringe su alcance temporal. Frente a esta limitación, el uso de madera subfósil permite ampliar la ventana temporal de análisis mediante la incorporación de registros de crecimiento de ancho de anillo más longevos, que no están representadas en las cronologías construidas con individuos vivos (Roig et al. 1996). En este contexto, las cronologías flotantes constituyen una herramienta fundamental en dendrocronología, puesto que permiten organizar y sincronizar secuencias de anillos de crecimiento provenientes de árboles muertos cuya posición temporal absoluta aún no ha sido definida, pero que conservan patrones comparables entre sí (Fritts 1976, Roig et al. 1996, Gutiérrez 2009).

En consecuencia, la relevancia de las cronologías flotantes radica en su capacidad para extender los registros dendrocronológicos hacia el pasado y, al mismo tiempo, fortalecer la señal común del crecimiento radial mediante el aumento de la replicación de series antiguas (Fritts 1976, Bridge y Ogden 1986, Roig et al. 1996). Se ha demostrado que la madera preservada en ambientes naturales favorables mantiene una alta integridad estructural y una señal de crecimiento coherente, lo que permite su datación cruzada y su eventual integración con cronologías de ancho de anillo previamente datadas, ampliando así la base temporal disponible para estudios paleoambientales y dendroclimáticos de largo plazo (Roig et al., 1996). En este sentido, el desarrollo y análisis de cronologías flotantes contribuyen a mejorar la continuidad y robustez de los registros dendrocronológicos regionales hacia el pasado, proporcionando un marco temporal más amplio para interpretar los cambios ambientales recientes dentro de una perspectiva histórica extendida.

La Cordillera de los Andes se compone de una extensa cadena montañosa que se prolonga por más de 8.000 km a lo largo del borde occidental de Sudamérica, desde los 11° N en Colombia hasta los 56° S en el extremo austral de Chile y Argentina (Masiokas et al. 2020). Su notable amplitud latitudinal y diversidad topográfica generan una amplia gama de condiciones climáticas, dando origen a una variedad excepcional de ecosistemas forestales. En Chile, estas condiciones permiten la existencia de distintos tipos de bosque, que abarcan desde formaciones xerofíticas en las zonas más áridas del norte hasta densos bosques templados y subantárticos en el sur, los cuales destacan por su alto endemismo y relevancia ecológica (Bahamóndez et al. 2020). Entre estos ecosistemas, los bosques subantárticos de Chile y

Argentina presentan una especial importancia ecológica, ya que se desarrollan bajo condiciones climáticas extremas, dominados por especies del género *Nothofagus* y moldeados por la persistencia de los vientos del oeste y una marcada estacionalidad (Collado y Farina 2006). Estos bosques poseen una estructura compleja y un denso dosel que contribuyen a la regulación hidrológica, la acumulación de carbono y la formación de suelos orgánicos ricos en materia muerta y madera en descomposición (Gutiérrez et al. 1991, Molina 2022). Asimismo, estos ecosistemas albergan una profunda historia evolutiva, actuando como refugios de especies altamente adaptadas a climas extremos, lo que les confiere un elevado valor científico y patrimonial (Fuentes et al. 2018).

En los bosques del sur de la Patagonia y Tierra del Fuego, *Nothofagus betuloides* es una especie dominante, constituye el Tipo Forestal Coigüe de Magallanes, donde se asocia a diversos tipos de vegetación, formando bosques siempreverdes puros o en combinación con otras especies (Donoso 2006). En el Tipo forestal se identifican cuatro formaciones principales: bosques siempreverdes puros de *N. betuloides*; bosques mixtos siempreverdes junto a *Drimys winteri*; bosques mixtos con *Pseudopanax laetevirens*; y bosques mixtos siempreverde-caducifolios junto a *N. pumilio* (Pisano 1977). Por lo que, *N. betuloides* desempeña un rol ecológico clave en la estructura y composición de los bosques subantárticos. Una segunda especie relevante de los bosques de Tierra de Fuego es *N. pumilio* (lenga), una especie arbórea caducifolia endémica de los bosques templados de Sudamérica (Donoso 2006). *N. pumilio* se desarrolla en forma achaparrada o *Krummholz* en su límite altitudinal, debido a las condiciones extremas como vientos fuertes, bajas temperaturas y peso de la nieve, donde tiende a coexistir con *N. antartica* (Frangi et al. 2004, Donoso 2006). En contraste, los individuos de mayor altura, diámetro y cobertura de copas se encuentran a bajas elevaciones en suelos más desarrollados y drenados (Frangi et al. 2004). Hacia el este de Tierra del Fuego, forma extensos bosques puros bajo condiciones secas que limitan el establecimiento de otras especies, y hacia el oeste forma bosques mixtos con *N. betuloides* en sectores de mayor humedad, donde dependiendo de la proporción de cada especie, esta formación da origen al Tipo Forestal Coihue de Magallanes (Veblen et al. 1996, Donoso 2006).

El estudio de la dinámica de crecimiento, la respuesta ambiental y la historia ecológica de ambas especies es posible investigarla a través de la dendrocronología, que estudia el crecimiento de especies leñosas mediante el análisis de los anillos anuales formados en la madera en relación con el tiempo (Stokes and Smiley 1968, Bernabei y Macchioni 2012). En regiones con estaciones climáticas marcadas, como el sur de Chile, los árboles detienen su crecimiento radial durante el otoño e invierno y lo reactivan en primavera y verano. Este ritmo estacional queda registrado en el tronco como una secuencia de anillos visibles en un corte transversal, permitiendo asignar un año calendario exacto a cada uno (Schweingruber

1996, Le Quesne et al. 2014). Por ende, la capacidad de datación precisa convierte a los árboles en archivos naturales de alta resolución temporal, capaces de registrar variaciones climáticas, perturbaciones ambientales y procesos ecológicos a lo largo del tiempo (Fritts, 1976, Amoroso et al. 2015, Gutiérrez 2009, Morales et al. 2020). A partir de la identificación y comparación de estos anillos, se construyen cronologías que permiten comprender la historia del crecimiento de un bosque y sus vínculos con el ambiente.

Diversos estudios dendrocronológicos realizados en la Patagonia austral han demostrado que *N. betuloides* presenta una marcada sensibilidad a las variaciones climáticas, especialmente a los componentes térmicos del ambiente. Villalba et al. (2012) observaron que el crecimiento radial de esta especie se reduce significativamente durante veranos más cálidos, efecto que se intensifica bajo condiciones dominadas por la fase positiva del Modo Anular del Sur (SAM), que influye en la circulación atmosférica del hemisferio sur al regular el gradiente de presión entre latitudes medias y altas, modulando la intensidad y posición de los vientos del oeste, su fase positiva se asocia a un desplazamiento hacia el sur de los vientos del oeste, generando condiciones más cálidas y secas en gran parte de la Patagonia, lo que sugiere una creciente limitación hídrica en su distribución meridional. Por su parte, Soto-Rogel y Aravena (2017) identificaron contrastes regionales en la respuesta climática de la especie en la Cordillera de Darwin, donde los sitios orientales mostraron correlaciones negativas con la temperatura y la precipitación estival, mientras que los sitios occidentales reflejaron relaciones positivas con estas mismas variables, evidenciando un fuerte gradiente de sensibilidad oeste-este. En la isla Navarino, Llancabure (2011) detectó que el crecimiento de *N. betuloides* se ve afectado negativamente por las temperaturas de invierno y primavera, así como por el índice de Oscilación Antártica (AAO) durante casi todo el año, señalando además una disminución sostenida del crecimiento a partir de la década de 1980, que puede estar asociada a condiciones termohídricas más restrictivas. Complementariamente, Fuentes et al. (2018) confirmaron que la temperatura y la precipitación locales son los principales controladores del crecimiento radial, además detectaron influencia de forzantes oceánico-atmosféricos como el SAM y la temperatura superficial del mar del Pacífico sur en ciertos sitios del norte de la distribución de la especie.

Estudios realizados en bosques de *N. pumilio* han mostrado una respuesta climática robusta en Tierra del Fuego. En una perspectiva de largo plazo, Roig et al. (1996) construyeron una cronología flotante con algunos vacíos en ciertos periodos, utilizando maderas subfósiles de especies del género *Nothofagus* permitiendo extender el registro dendrocronológico de *N. pumilio* hacia el pasado en Tierra del Fuego mediante datación por radiocarbono, evidenciando que los patrones de crecimiento observados en los registros más actuales son consistentes con aquellos del pasado. Asimismo, los autores señalan que

durante los últimos 1400 años destaca un ciclo recurrente de aproximadamente 7 años en *N. pumilio* (Roig et al. 1996). A partir de un extenso análisis latitudinal que abarca el límite arbóreo andino entre los 35° y 55° S, Lara et al. (2005) demostraron que el crecimiento radial de *N. pumilio* en Tierra del fuego y alrededores se encuentra positivamente relacionado con la temperatura media anual, reflejando una condición térmica limitada. Este patrón también fue evidenciado anteriormente por Aravena et al. (2002), quienes en base a un conjunto de cronologías de *N. pumilio* desarrolladas en Tierra del Fuego y sectores adyacentes, observaron incrementos sostenidos del crecimiento radial desde la década de 1960, y una relación positiva con las temperaturas registradas en la región durante la segunda mitad del siglo XX. Además, identificaron la presencia de un ciclo recurrente cercano a los 7 años en las cronologías estudiadas, patrón que constituye una señal distintiva del crecimiento de *N. pumilio* en estas latitudes (Aravena et al. 2002). Más recientemente, un estudio realizado por Matskovsky et al. (2019) profundizaron en este comportamiento cíclico de 7 años, también mencionado por Roig et al. (1996) y Aravena et al. (2002), indicando que gran parte de esta variabilidad en el crecimiento radial de *N. pumilio* responde a forzantes no climáticos, probablemente vinculados a perturbaciones bióticas como eventos periódicos de defoliación, sin embargo, los datos obtenidos en el estudio no validan esta hipótesis.

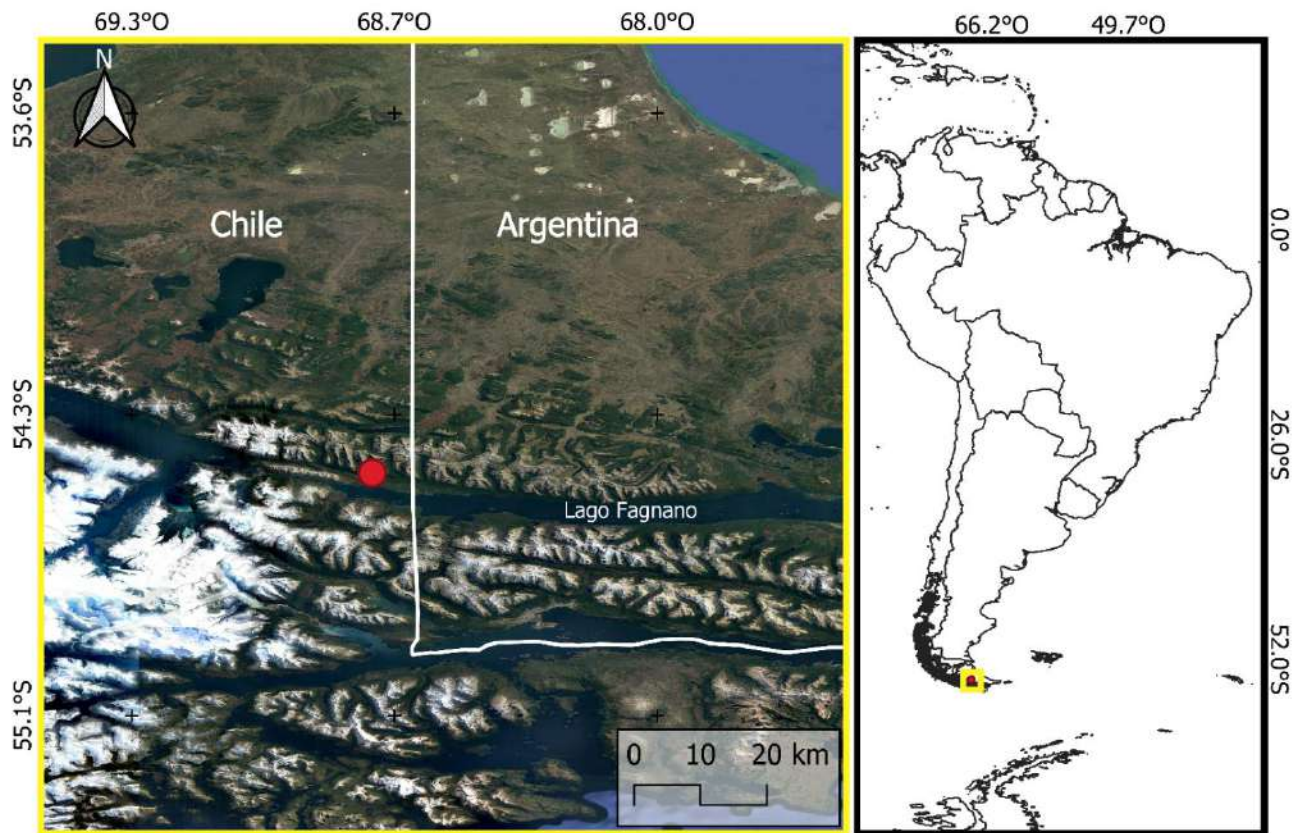
A partir de lo expuesto anteriormente, el objetivo general del presente trabajo es evaluar el potencial de la madera relicta de *N. betuloides* y *N. pumilio* para la elaboración de cronologías flotantes, en el extremo sur de Chile, Región de Magallanes. Para dar respuesta al objetivo principal, se definen los siguientes objetivos específicos:

- Desarrollar cronologías flotantes de ancho de anillos para las especies *N. betuloides* y *N. pumilio* en el sector de Lago Fagnano, Isla Grande de Tierra del Fuego.
- Analizar los patrones de crecimiento radial de la cronología desarrollada y su coherencia en la señal con otros registros multicentenarios de *N. betuloides* y *N. pumilio* de la región de estudio.

## **2. METODOLOGÍA**

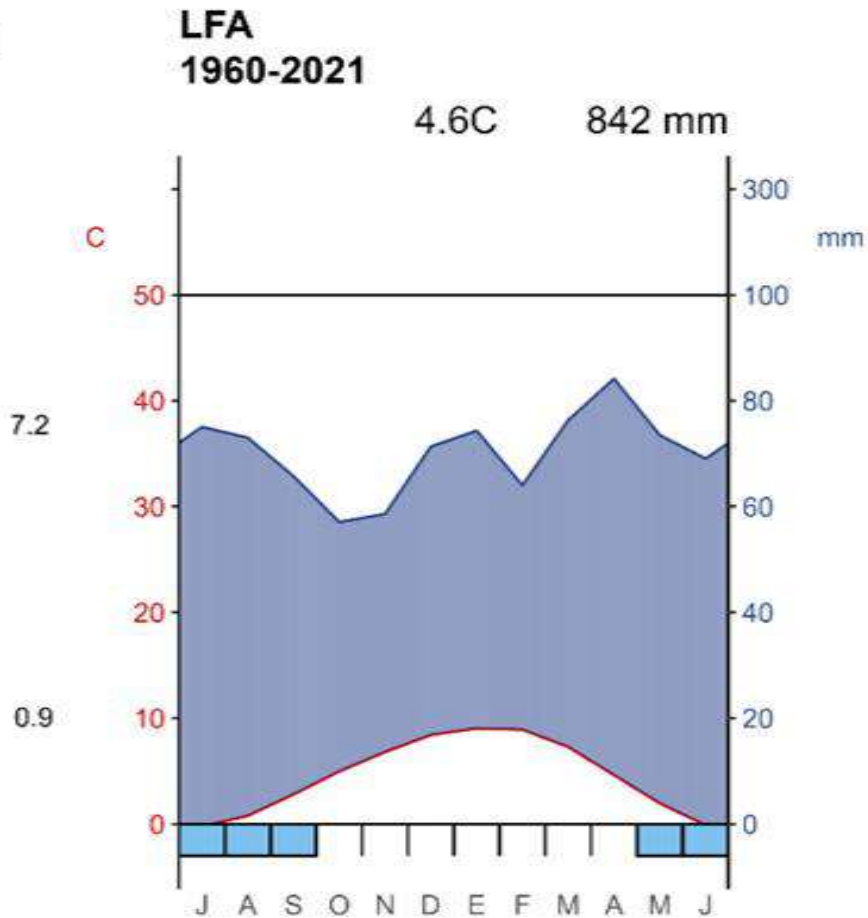
### **2.1. Área de estudio**

El área de estudio se encuentra ubicada en la Región de Magallanes y la Antártica Chilena, en el sudoeste de la Isla Grande Tierra del Fuego, comuna de Timaukel, en un cordón montañoso que rodea el Lago Fagnano específicamente a los 54°28'S – 68°70'W, a una elevación sobre los 300 m de altitud (figura 1).



**Figura 1.** Ubicación geográfica del área de estudio indicado con el punto rojo, la línea continua blanca señala el límite internacional entre Chile y Argentina. El mapa de la derecha indica la ubicación del área de estudio en Sudamérica.

El clima dominante en las proximidades de Lago Fagnano según la clasificación de Köppen – Geiger (1936) pertenece al clima de tundra (ET). Presenta un clima hiperhúmedo y moderadamente frío, que, debido a la influencia oceánica y los vientos dominantes del oeste, tiene un ciclo estacional reducido (Fuentes et al. 2018). Según los datos meteorológicos obtenidos del CR<sub>2</sub> MET para el sitio de estudio, las precipitaciones medias se estiman en 842 mm anuales. En el caso de la temperatura media anual alcanza los 4,6°C, cuyos meses más cálidos (enero y febrero) tienen una media cercana a los 10°C, mientras que los meses más fríos (junio y julio) en invierno alcanzan un promedio de 0 °C (figura 2).



**Figura 2.** Climograma del sitio de estudio con la temperatura media mensual (°C) y la precipitación acumulada mensual promedio (mm). En la parte superior central se muestra la temperatura media anual y a la derecha el promedio de la precipitación acumulada anual.

Los suelos donde crecen *N. betuloides* y *N. pumilio* a elevaciones y pendientes como las que se sitúa el área de estudio, corresponden al orden de los Inceptisoles. En términos generales, este tipo de suelos son jóvenes, ácidos y poco desarrollados, presentando perfiles delgados a moderadamente profundos, encontrándose sobre depósitos de origen glacial y fuertemente influenciados por la actividad volcánica de la región (Gerding y Thiers 2002, Thiers y Gerding 2007).

## 2.2. Especies en estudio

Dentro de las formaciones boscosas características del área de estudio, destaca *N. betuloides*, conocida comúnmente como coihue de magallanes, es una especie arbórea de hoja perenne, endémica y característica de los bosques subantárticos de Chile y Argentina. En Chile, su distribución se extiende

desde Valdivia (40° 31' S) hasta el archipiélago del Cabo de Hornos (56° 31' S), mientras que en Argentina crece entre los 48° S y el extremo meridional de Tierra del Fuego a los 56° S (Donoso 2006, Promis 2008). Es una de las especies más longevas del género *Nothofagus* en Sudamérica, pudiendo alcanzar más de 600 años de edad (Gutiérrez et al. 1991, Promis 2008). Coihue de magallanes puede alcanzar alturas de 20 m y en ocasiones es posible encontrar individuos de hasta 35 m, aunque también puede presentarse en forma arbustiva, el tronco presenta diámetros de hasta 2 metros en Magallanes y Tierra del Fuego, pero en su distribución norte es más pequeño (Donoso 2006, Promis 2008). En el sector norte de su distribución cerca de Valdivia, *N. betuloides* se desarrolla en condiciones más extremas, alcanzando el límite altitudinal del bosque por sobre los 800 m en la Cordillera de la Costa y superando los 1000 m en la Cordillera de los Andes, donde se aproxima al límite superior de la vegetación arbórea (Frangi et al. 2004, Donoso 2006, Promis 2008). En cambio, hacia el sur de su rango de distribución, la especie se encuentra tanto en áreas continentales bajas como en islas, creciendo desde el nivel del mar hasta los 350 m de elevación aproximadamente, adaptándose a un amplio rango de condiciones ecológicas (Frangi et al. 2004, Promis 2013).

A lo largo de su extensa distribución latitudinal, *N. betuloides* crece en diversas condiciones climáticas que varían marcadamente según la latitud. Al norte de su distribución, *N. betuloides* crece en el clima templado húmedo con efecto de altitud de ambas cordilleras y más al sur pasando los 44°S en las alturas de la Cordillera de los Andes la temperatura disminuye pasando a un clima oceánico templado húmedo (Donoso 2006). Al sur de los 47°S, donde la especie crece principalmente en islas, las precipitaciones se dan en forma de lluvia alcanzando en algunas ocasiones los 7500 mm al año (Donoso 2006). Mientras que, a los 52°S en territorio continental donde *N. betuloides* crece cerca de campos de hielo, la precipitación ocurre en forma de nieve, siendo un clima menos lluvioso y más ventoso (Donoso 2006).

Otra especie presente en el área de estudio, representativa de los bosques subantárticos de Chile y Argentina es *N. pumilio*, de nombre común lenga, es una especie arbórea caducifolia endémica de los bosques templados de Sudamérica (Donoso 2006). Particularmente en Chile, lenga tiene la distribución geográfica más extensa entre las especies de *Nothofagus* abarcando aproximadamente 2200 km (Lara et al. 2005, Donoso 2006, Serrano-León y Christie 2020). En la Cordillera de los Andes abarca desde la región del Maule en la cordillera de Talca (35° 35' S) hasta Cabo de Hornos en la región de Magallanes (55° 31' S) (Veblen 1996, Lara et al. 2005, Donoso 2006). Asimismo, es posible encontrar poblaciones de lenga en la Cordillera de la Costa, en las partes altas de Nahuelbuta y también en la Cordillera Pelada en la región de Los Ríos (Veblen et al. 1996, Donoso 2006). Se estima que la superficie ocupada por los

bosques de lenga ronda las 3.4 millones de ha (Gutierrez Caro et al. 2022). Respecto al tiempo de vida de *N. pumilio* se ha documentado que alcanza una longevidad que está entre los 350 a 400 años (Frangi et al. 2004, Donoso 2006). Además, es un árbol de gran tamaño, cuya altura llega hasta los 30 m y un máximo de 1,7 m de diámetro (Frangi et al. 2004, Donoso 2006). Al norte de su distribución, *N. pumilio* crece sobre los 1000 hasta los 2000 m de elevación, correspondiente al límite altitudinal arbóreo, mientras que, hacia el sur de su distribución después de los 44° S, se establece gradualmente a menor altitud alcanzando el nivel del mar en Magallanes y Tierra del fuego (Veblen et al. 1996, Donoso 2006).

Debido a su amplia distribución latitudinal y altitudinal, *N. pumilio* es capaz de establecerse en diversos ambientes ecológicos, en consecuencia, el clima asociado a su distribución presenta variaciones regionales significativas, sin embargo, comparten denominadores comunes como las bajas temperaturas, fuertes vientos y precipitaciones en forma de nieve (Veblen et al. 1996, Löewe et al. 1998, Donoso 2006). Al norte de su distribución, el desarrollo de *N. pumilio* se vincula a un clima templado-cálido con influencia mediterránea caracterizado por veranos secos, pero predominan las bajas temperaturas y las precipitaciones pueden alcanzar los 1000 a 1500 mm/año en la cordillera andina, concentrándose principalmente en forma de nieve durante el invierno (Löewe et al. 1998, Donoso 2006). Hacia el sur de los 38°S, la influencia mediterránea del clima comienza a disminuir; en la región de los Ríos, aproximadamente en los 40°S las precipitaciones son superiores alcanzando valores de 2000 a 5000 mm/año, distribuidas durante todo el año y ocurre mayormente en forma de nieve (Löewe et al. 1998, Donoso 2006). Más al sur, en las regiones de Aysén y Magallanes, *N. pumilio* crece en bajo el efecto del clima trasandino con degeneración esteparia (Löewe et al. 1998, Donoso 2006). En Aysén, las precipitaciones alcanzan los 2500 mm/año en la cordillera y 500 mm/año en la estepa patagónica; mientras que, en Magallanes y Tierra del Fuego las precipitaciones experimentan una disminución de oeste a este, que va desde los 600 mm/año hasta los 150 mm/año, a causa de la degeneración esteparia (Löewe et al. 1998, Frangi et al. 2004, Donoso 2006).

### **2.3. Colecta y procesamiento de muestras**

La colecta de muestras de madera relictas de *N. betuloides* y *N. pumilio* en el área de estudio se realizó en enero del año 2025, por investigadores del Laboratorio de Dendrocronología y Cambio Global de la Universidad Austral de Chile. En total, se recolectaron aproximadamente 60 rodelas provenientes de árboles muertos, de las cuales 41 fueron finalmente consideradas para este estudio. A cada muestra se

les asignó el código LFA en referencia al sitio (Lago Fagnano) junto con un número de tres dígitos para diferenciar cada muestra. Es importante precisar que no todas las muestras extraídas presentaban centro.

Posteriormente, las muestras fueron llevadas al Laboratorio de Dendrocronología y Cambio Global de la Universidad Austral de Chile, donde se dejaron secar a temperatura ambiente. Una vez finalizado el tiempo de secado, se aplicó una mezcla de agua y cola fría en ambas caras de cada rodela, con la finalidad de evitar grietas o deterioros en la muestra. Este proceso se repitió al menos dos a tres veces, dependiendo del estado de la madera, lo que permitió preservar adecuadamente las muestras para el posterior proceso de lijado.

Una vez seco el pegamento, se aplicaron las técnicas dendrocronológicas estándar implementadas por Stokes y Smiley (1968), comenzando con el desbastado en una cara de las rodelas, utilizando una lijadora de banda con una lija de granulometría 80 granos/cm<sup>2</sup>. Este primer lijado permitió emparejar las muestras y dejarlas planas, posteriormente con una lijadora orbital usando lijas con granulometría ascendente, comenzando con una lija de 80 granos/cm<sup>2</sup> para eliminar las rayas dejadas por la lijadora de banda, luego usando lijas de 120, 180, 240, 320, 400, hasta finalizar con una lija de 600 granos/cm<sup>2</sup>. Este proceso permitió obtener una mayor claridad de los anillos de crecimiento.

#### **2.4. Fechado y medición de los anillos de crecimiento**

El fechado de las muestras se realizó a través de una lupa estereoscópica con aumento de x60 logrando en primer lugar, la visualización de los anillos de crecimiento y posteriormente comenzando el conteo de los anillos desde la médula hacia la corteza. Para tener coherencia con el fechado, se utilizó la simbología descrita por Stokes y Smiley (1968): año cero y año de término (x), cada diez años (•), cada cincuenta años (••) y cada cien años (•••). Además, en cada muestra se determinó un total de dos radios o series de crecimiento, con el propósito de tener mayor precisión en la datación de los anillos de crecimiento y minimizar errores asociados a la variabilidad del crecimiento radial. Siguiendo la convención de Schulman (1956) para el hemisferio sur, a cada anillo de crecimiento se le asignó el año calendario en que comenzó su formación.

Con las muestras ya fechadas, se efectuó la medición de los anillos de crecimiento. Para ello, se utilizó un dendrómetro VELMEX Inc con precisión de 0,001 mm, que además incluye la plataforma de medición y un pulsador que va registrando las mediciones de cada anillo. También se usó una lupa estereoscópica y el software Measure J2X que guarda todos los registros de medición en un archivo txt.

## 2.5. Construcción de las cronologías de ancho de anillo

Un proceso fundamental para la obtención de una cronología de ancho de anillo es el cofechado, técnica que se basa en contrastar los patrones de variación en los anchos de anillos de las distintas series de crecimiento, haciendo posible determinar coincidencias entre las series y así identificar con precisión el año de formación de cada anillo (Fritts 1976). El software COFECHA (Holmes 1983) es el que permite verificar la calidad del fechado, a través de análisis estadísticos compara las series y detecta posibles errores en las mediciones. Cabe mencionar que se espera desarrollar una cronología flotante, puesto que se trabajó con maderas relictas de árboles muertos, por ende, la semejanza entre las series no se debe a una fecha absoluta.

Una vez finalizado el proceso de cofechado y seleccionadas las series que presentaban mayor coherencia y calidad de datación, se procedió a construir las cronologías para *N. betuloides* y *N. pumilio*. Con este propósito, se utilizaron las series de ancho de anillo correctamente cofechadas, las cuales fueron procesadas en el software R (R Core Team 2022) mediante la interfaz gráfica RStudio, empleando el paquete dplR (Bunn 2008). En una primera etapa, se desarrolló una cronología estándar (RWI) aplicando un procedimiento de estandarización, que consistió en ajustar una curva exponencial negativa a cada serie individual. Este paso permitió corregir las tendencias de crecimiento asociadas al envejecimiento natural de los árboles y a posibles perturbaciones ecológicas (Fritts 1976).

Posteriormente, se construyó una cronología residual a partir del modelado autorregresivo de las series estandarizadas. Este proceso tuvo por objetivo eliminar la autocorrelación temporal presente entre los anchos de anillos consecutivos, conservando solo la señal de alta frecuencia, es decir, la variabilidad interanual. Tras el ajuste de las curvas, estas fueron promediadas mediante la función de media robusta ponderada, lo que permitió generar dos cronologías finales: una estándar y otra residual, ambas expresadas como índices adimensionales con una media cercana a 1 y una varianza medianamente homogénea. Finalmente, se analizó la robustez de la cronología utilizando el software ARSTAN (Cook y Holmes 1996), a través del índice de Señal Expresada de la Población (EPS), con un umbral de aceptación  $\geq 0,85$  (Wigley et al. 1984). Este valor aseguró que el período seleccionado para análisis representara una señal común fuerte entre las muestras, permitiendo así validar la confiabilidad de la cronología obtenida.

Asimismo, en el software R se elaboraron gráficos de análisis de Wavelet por medio del paquete biwavelet (R Core Team 2022, <https://github.com/tgouhier/biwavelet>), utilizando las cronologías estándar de *N. betuloides* y *N. pumilio* respectivamente. El análisis proporciona el estudio de las

variaciones periódicas e intermitentes presentes en la serie de datos mediante una representación tiempo-frecuencia. (Mallat 1998, Torrence y Compo 1998). Para este análisis, se consideró únicamente el período de tiempo que contempla una profundidad de muestras superior a 10 series de ancho de anillo.

Finalmente, con el objetivo de evaluar la relación entre el crecimiento radial de *N. betuloides* y *N. pumilio* y la variabilidad hidroclimática regional, se realizó un análisis de correlación entre las cronologías estándar de ancho de anillo para ambas especies y el Índice de Severidad de Sequía de Palmer PDSI del Atlas de Sequías de Sudamérica SADA (Disponible en <https://sada.cr2.cl/>). Para este análisis las cronologías desarrolladas fueron ajustadas considerando únicamente los períodos con una profundidad muestral superior a 10 series. El SADA proporciona una reconstrucción espacialmente continua de las condiciones de humedad del suelo en Sudamérica austral durante los últimos siglos, basada en una red extensa de cronologías dendrocronológicas y datos climáticos instrumentales (Morales et al. 2020).

## **2.6. Relación con otros registros multicentenarios de ancho de anillos cercanas al área de estudio**

Con el objetivo de evaluar la coherencia de la señal de crecimiento obtenida en las cronologías flotantes de *N. betuloides* y *N. pumilio* elaboradas para este estudio, se compararon, mediante el programa COFECHA y el software estadístico R, las cronologías derivadas de las maderas subfósiles con cronologías de edades absolutas previamente construidas en la región. En el caso de *N. betuloides*, se utilizó como referencia la cronología de ancho de anillo desarrollada por Llacabure (2011) a partir de muestras de la misma especie recolectadas en isla Navarino, a orillas del Lago Róbalo, la cual fue seleccionada por tratarse también de una cronología flotante, compartir condiciones ecológicas y ubicación geográfica similares y, además, por su amplia extensión temporal, que incrementa la probabilidad de una sólida sobreposición con la cronología obtenida en el presente trabajo. De manera complementaria, la cronología desarrollada para *N. pumilio* fue comparada con una cronología regional de la especie, facilitada por el Laboratorio de Dendrocronología y Cambio Global de la Universidad Austral de Chile, la cual está construida a partir de 35 cronologías desarrolladas en sitios adyacentes de la región de Magallanes. Para asegurar robustez de la señal común, se consideró un número superior a 10 series de ancho de anillo en las cronologías elaboradas para el sitio de estudio. Mientras que, la cronología regional fue ajustada para coincidir con el periodo temporal común de las cronologías estudiadas.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1. Desarrollo de las cronologías de ancho de anillos de *N. betuloides* y *N. pumilio*.

La cronología flotante de ancho de anillos para la especie *N. betuloides*, se construyó a partir de 18 muestras de madera subfósil y abarcó el periodo desde 1592 hasta 2013. Considerando todas las series con las que se elaboró la cronología, se midieron 6944 anillos. La edad mínima registrada entre las muestras es de 107 años, mientras que la muestra más longeva presenta una edad de 286 años y un promedio de edades de 192 años. La intercorrelación entre series alcanzó un valor de 0,56, indicando una coherencia en los patrones de crecimiento entre los individuos analizados, una sensibilidad media de 0,23 y un crecimiento medio anual de ancho de anillo de 1,29 mm. Finalmente, el cálculo del valor EPS arrojó que el índice es superior a 0,85 a partir del año 1617 hasta 1950 (cuadro 1).

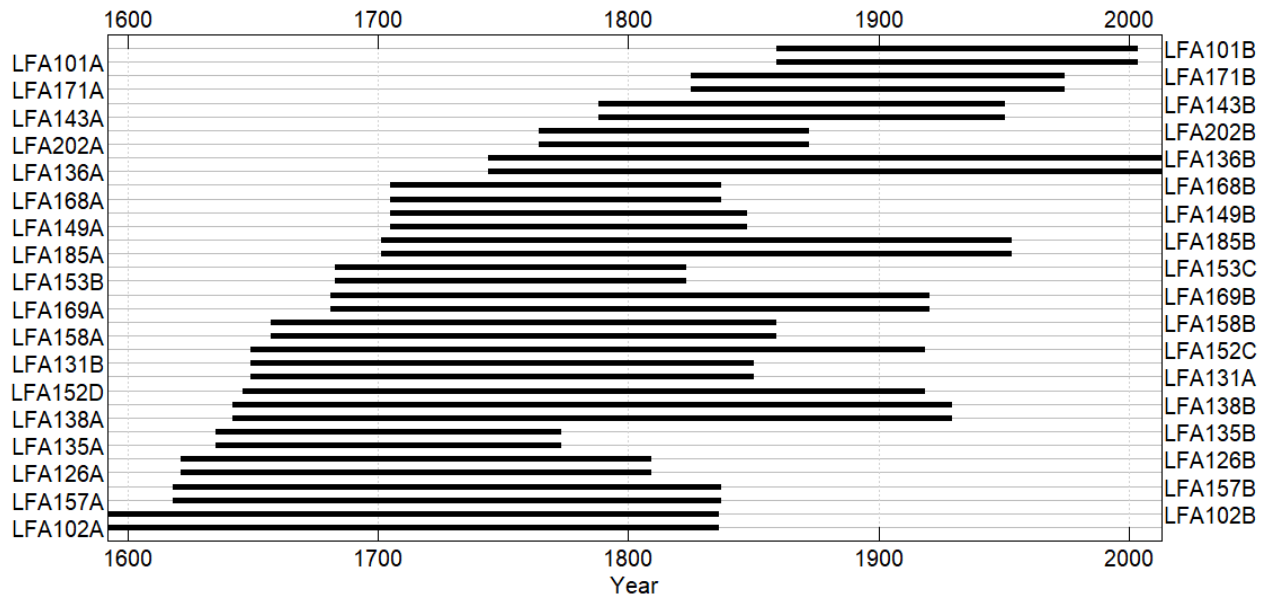
Por su parte, la construcción de la cronología de ancho de anillo para *N. pumilio* en el sitio de estudio, se realizó a partir de 20 muestras de maderas relictas, abarcó el periodo entre 1610 y 2005 y se midieron 7330 anillos. La intercorrelación entre las series de ancho de anillo es de 0,57, una sensibilidad media de 0,27 y un ancho medio anual de ancho de anillo de 1,33 mm. Los valores EPS superaron el umbral de 0,85 en el periodo 1720-1970, donde existe mayor robustez en la cronología (cuadro 1).

**Cuadro 1.** Estadísticos descriptivos para las cronologías de ancho de anillo de *N. betuloides* y *N. pumilio*.

Estadísticos	<i>N. betuloides</i>	<i>N. pumilio</i>
Número de árboles	18	20
Número de series	36	40
Periodo de tiempo	1592-2013	1610-2005
Edad mínima-media-máxima (años)	107-193-286	105-183-346
Número total de anillos medidos	6944	7330
Correlación entre series	0,56	0,57
Autocorrelación de orden 1	0,78	0,77
Sensibilidad media	0,23	0,27
Ancho medio de anillos/año (mm)	1,29	1,33
EPS > 0,85	1617- 1950	1720-1970

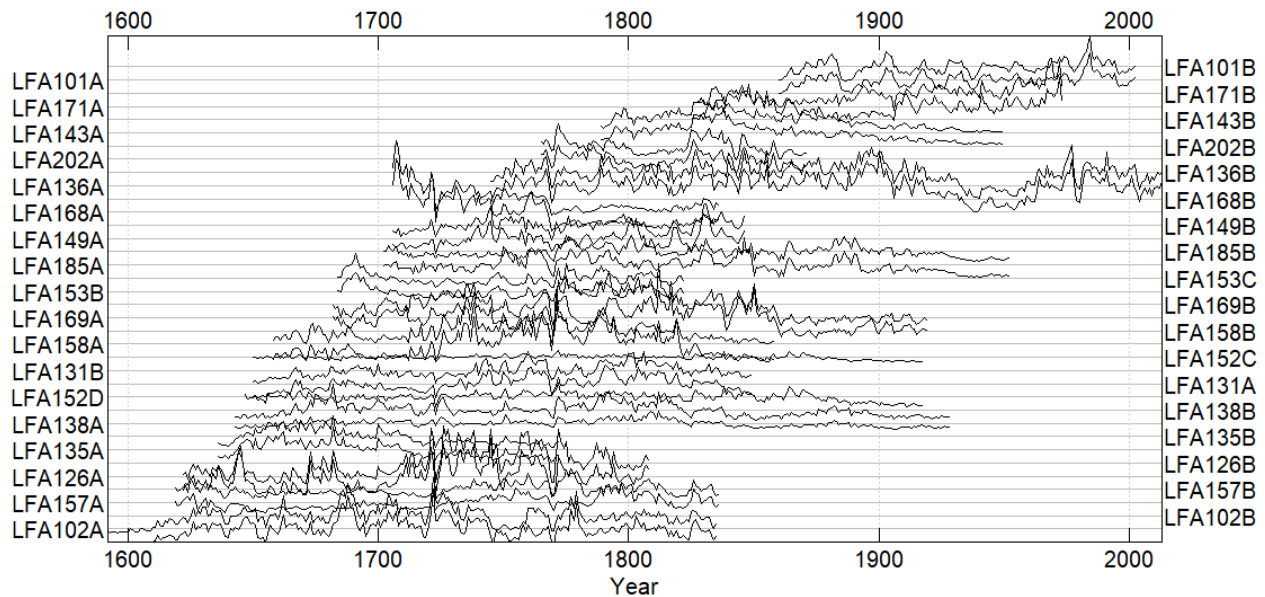
Con respecto a la distribución temporal de las series individuales que conforman la cronología de ancho de anillo de *N. betuloides* en el sector del lago Fagnano, la cronología resultante integra un total de 36 series y abarca un intervalo temporal de 422 años, entre 1592 y 2013 (Anexo 1). Las series presentan longitudes heterogéneas, observándose que en los primeros años del registro se presentan dos series activas entre 1592 y 1618; posteriormente, la profundidad de muestras aumenta progresivamente

alcanzando 26 series el año 1706, valor que se mantiene hasta 1746. El máximo número de series se concentra en dos intervalos, entre 1765-1772 y 1789-1808. A partir de este período, la cronología presenta una disminución sostenida del número de series hacia el presente, alcanzando seis series en 1953 y dos series en el tramo final 2003-2013. En conjunto, la superposición temporal de las series permite una cobertura continua del registro y sustenta la solidez de la cronología construida (figura 3, figura 5).



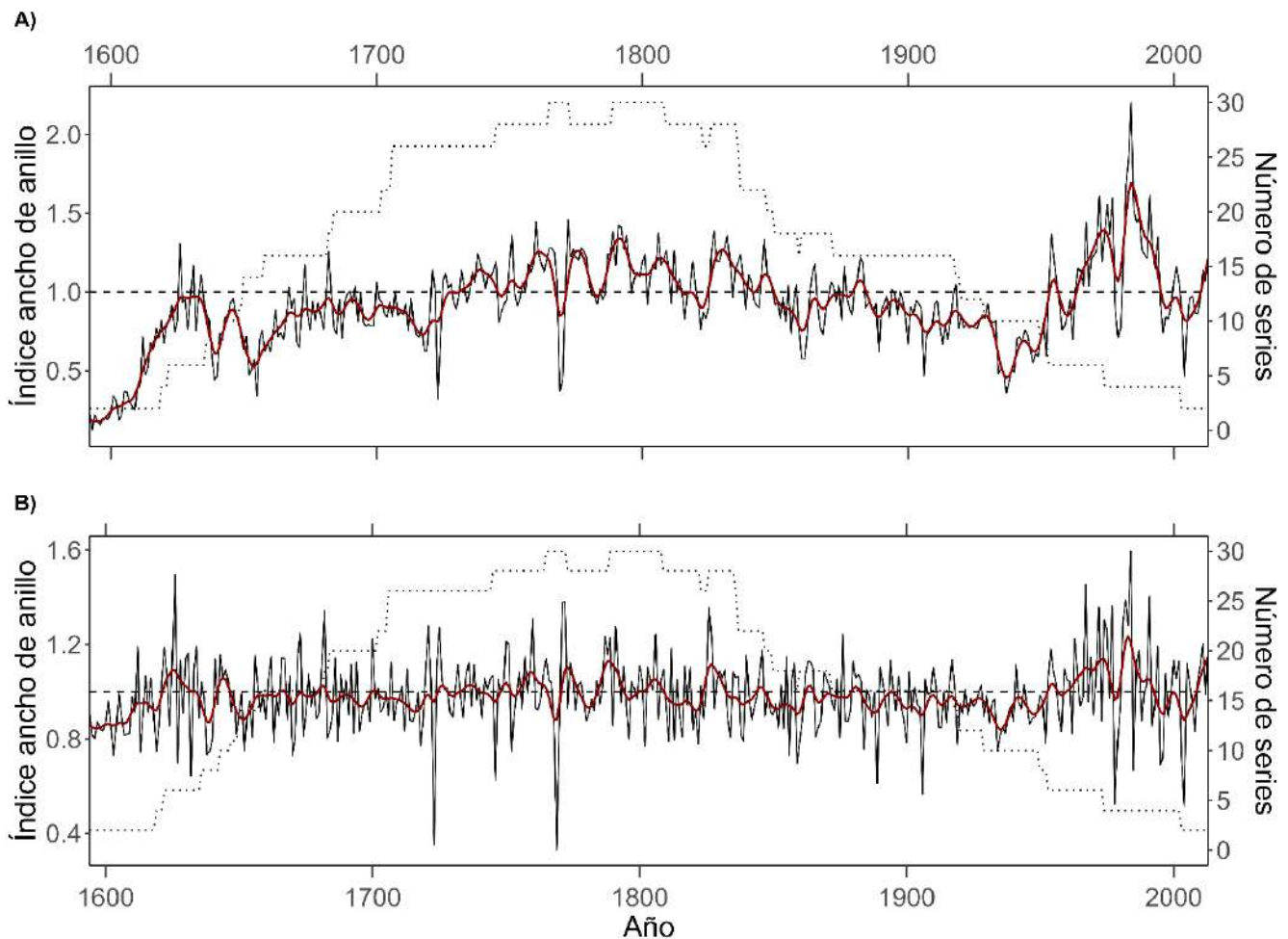
**Figura 3.** Temporalidad de las series incluidas en la cronología de *N. betuloides* en Lago Fagnano, donde las barras horizontales representan las 36 series temporales individuales de ancho de anillo con su respectivo código para el periodo de 1592-2013.

El siguiente gráfico denominado Spaghetti plot presenta la misma información que la figura anterior, sin embargo, además de mostrar la temporalidad de cada serie de ancho de anillo, posibilita identificar los patrones de crecimiento radial de forma individual. En las series que conforman la cronología de ancho de anillo se evidencia una marcada variabilidad en el crecimiento radial y, en determinados años, la presencia de patrones recurrentes comunes entre las series. Por ejemplo, en el año 1769 se identifica una marcada disminución en el crecimiento en la mayoría de las series de la cronología (figura 4).



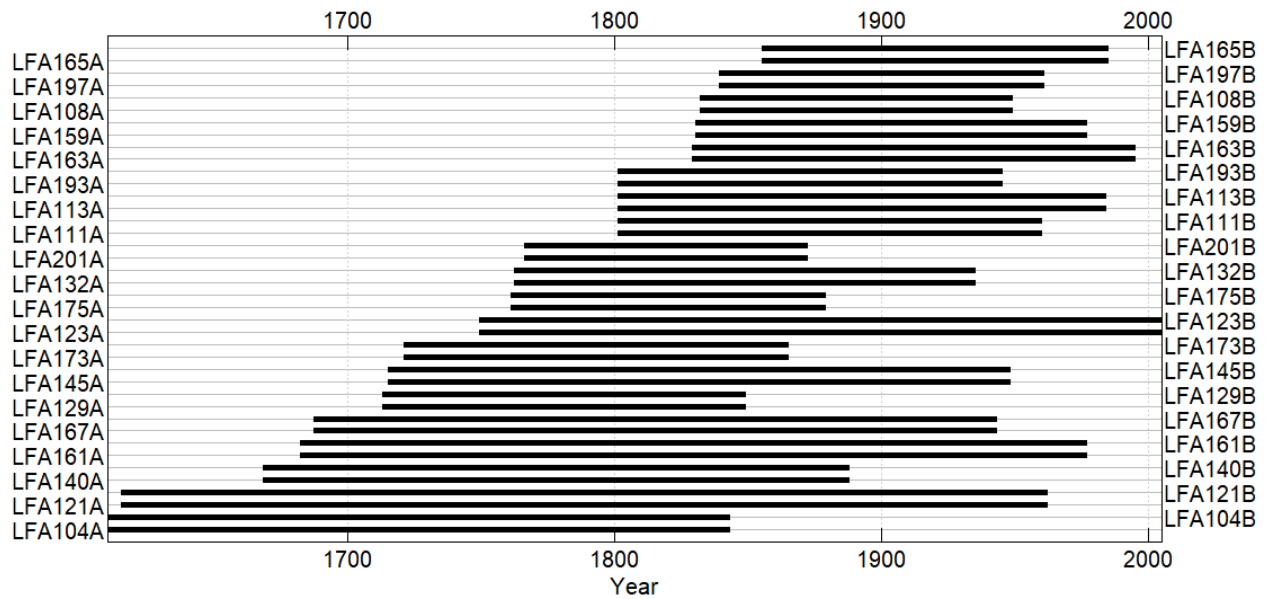
**Figura 4.** Curvas de crecimiento radial (spaghetti plot) de las series de ancho de anillos utilizadas en la cronología de *N. betuloides*. Se muestra cada una de las series con su respectivo código en el periodo común de 1592-2013.

A continuación, en la figura 5 se presenta la cronología estándar y residual de ancho de anillos desarrollada para *N. betuloides* en el sitio Lago Fagnano. Para resaltar las fluctuaciones de baja frecuencia, en ambas cronologías se calculó un spline de 10 años que suaviza estas variaciones eliminando el 50% de la varianza. En la cronología estándar se observa que existe una variabilidad interanual, con cierta alternancia de periodos de crecimiento por sobre y bajo la media. En el comienzo de la cronología, a través de las variaciones decadales se puede apreciar un crecimiento radial variable bajo la media entre los años 1592 hasta 1725 aproximadamente, periodo en el que se registra uno de los años de menor crecimiento, el 1723, identificado como un año marcador. Luego, la cronología muestra periodos de crecimiento radial por sobre la media entre 1726 y 1850, periodo en el cual también se presenta una disminución abrupta del crecimiento de la especie en el año 1769. Hacia el final de la cronología, en el periodo 1953-2002, el crecimiento radial comienza a incrementar notablemente por sobre la media, lo que se explica por el reducido número de series, que oscila entre 4 y 6 (figura 5).



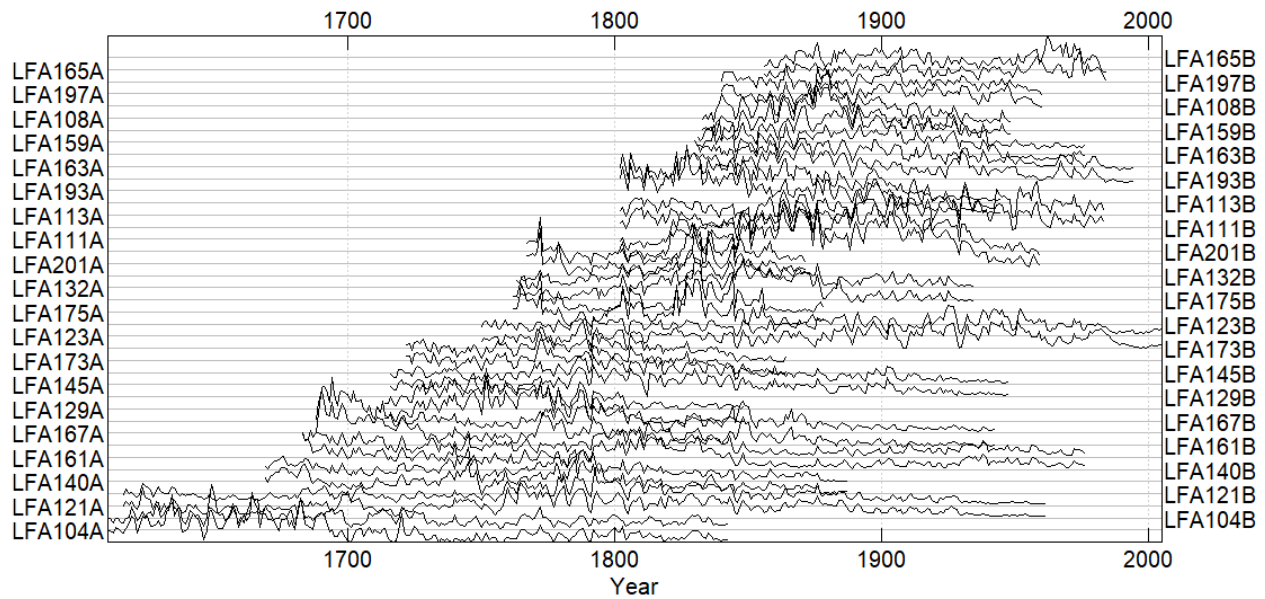
**Figura 5.** Cronología de ancho de anillos de *N. betuloides* para el sitio de Lago Fagnano en su versión estándar (A) y residual (B). Líneas rojas señalan una curva de spline suavizado en 10 años. Eje Y izquierdo: índice de ancho de anillo (RWI). Eje Y derecho: número de series.

La figura 6 presenta la distribución temporal de todas las series individuales de *N. pumilio* con las que se construyó la cronología de ancho de anillo en el sitio de Lago Fagnano. La cronología está compuesta por un total de 40 series, cubriendo un rango temporal de 395 años, entre los años 1610 y 2005 (Anexo 2). Las series, al igual que en *N. betuloides* evidencian heterogeneidad en su extensión, donde la muestra de menor longitud temporal presenta 105 años (LFA 201) y la muestra más extensa 346 años (LFA 121). En el comienzo de la cronología, entre 1610 y 1615 existen solo dos series en el registro, a medida que continua la cronología el número de series va en aumento progresivo alcanzando un total de 38 series de ancho de anillo, entre 1840 y 1842. Pasado este periodo la profundidad de series experimenta una disminución hacia el presente quedando solo 2 para el periodo final 1994-2005 (figura 6 y 8).



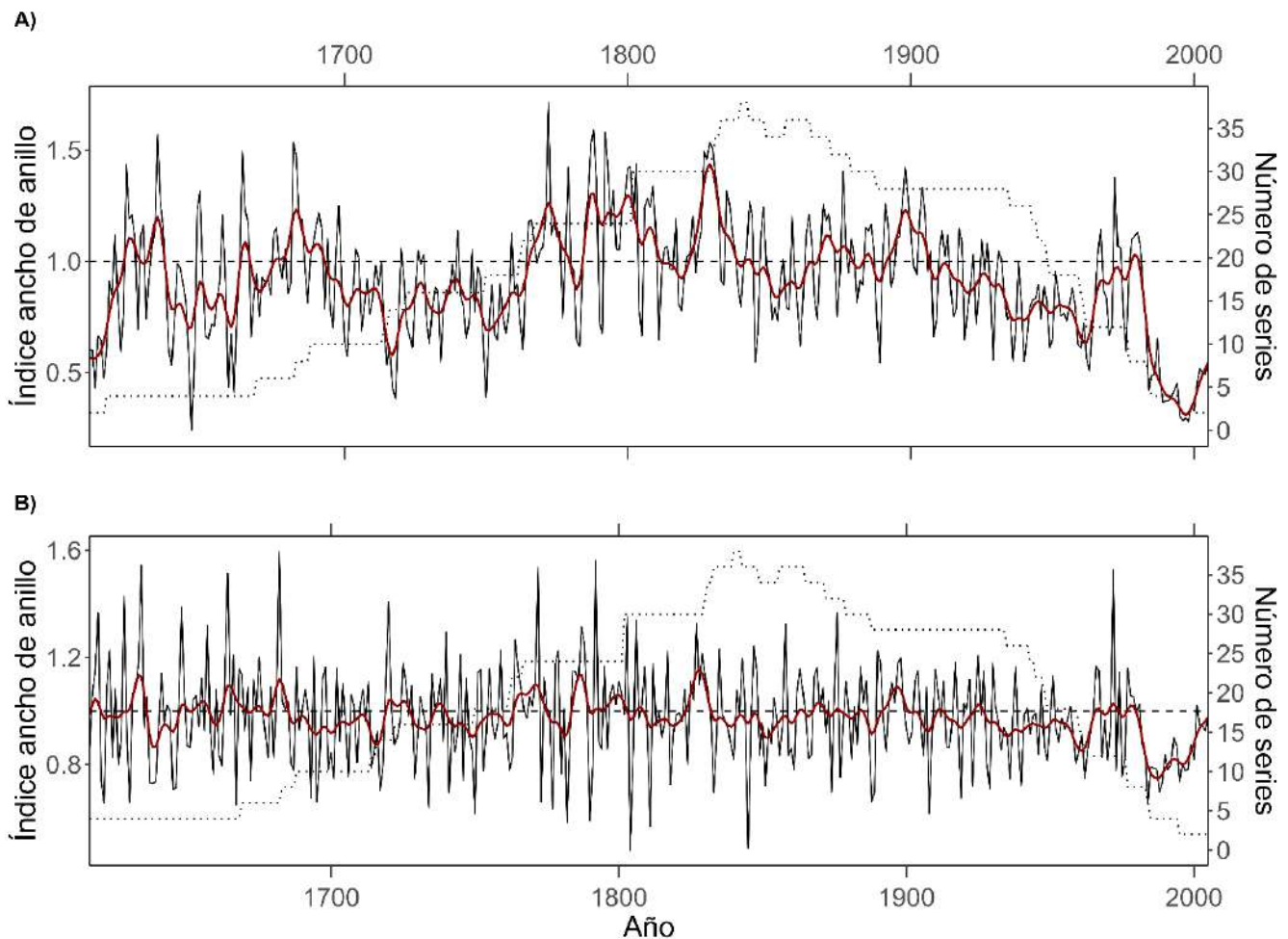
**Figura 6.** Temporalidad de las series incluidas en la cronología de *N. pumilio* en Lago Fagnano, donde las barras horizontales representan las 40 series temporales con su respectivo código para el periodo de 1610-2005.

El gráfico Spaghetti plot correspondiente a *N. pumilio*, presentado en la figura 7, muestra una alta variabilidad en el crecimiento radial de las series individuales de ancho de anillo. Asimismo, se aprecia la presencia de patrones recurrentes en el crecimiento radial de algunas series durante determinados períodos a lo largo de la extensión de la cronología. Por ejemplo, se muestra una abrupta disminución en el crecimiento el año 1790.



**Figura 7.** Curvas de crecimiento radial (spaghetti plot) de las series de ancho de anillos utilizadas en la cronología de *N. pumilio*. Se muestra cada una de las series (de ancho de anillos) con su respectivo código en el periodo común de 1610-2005.

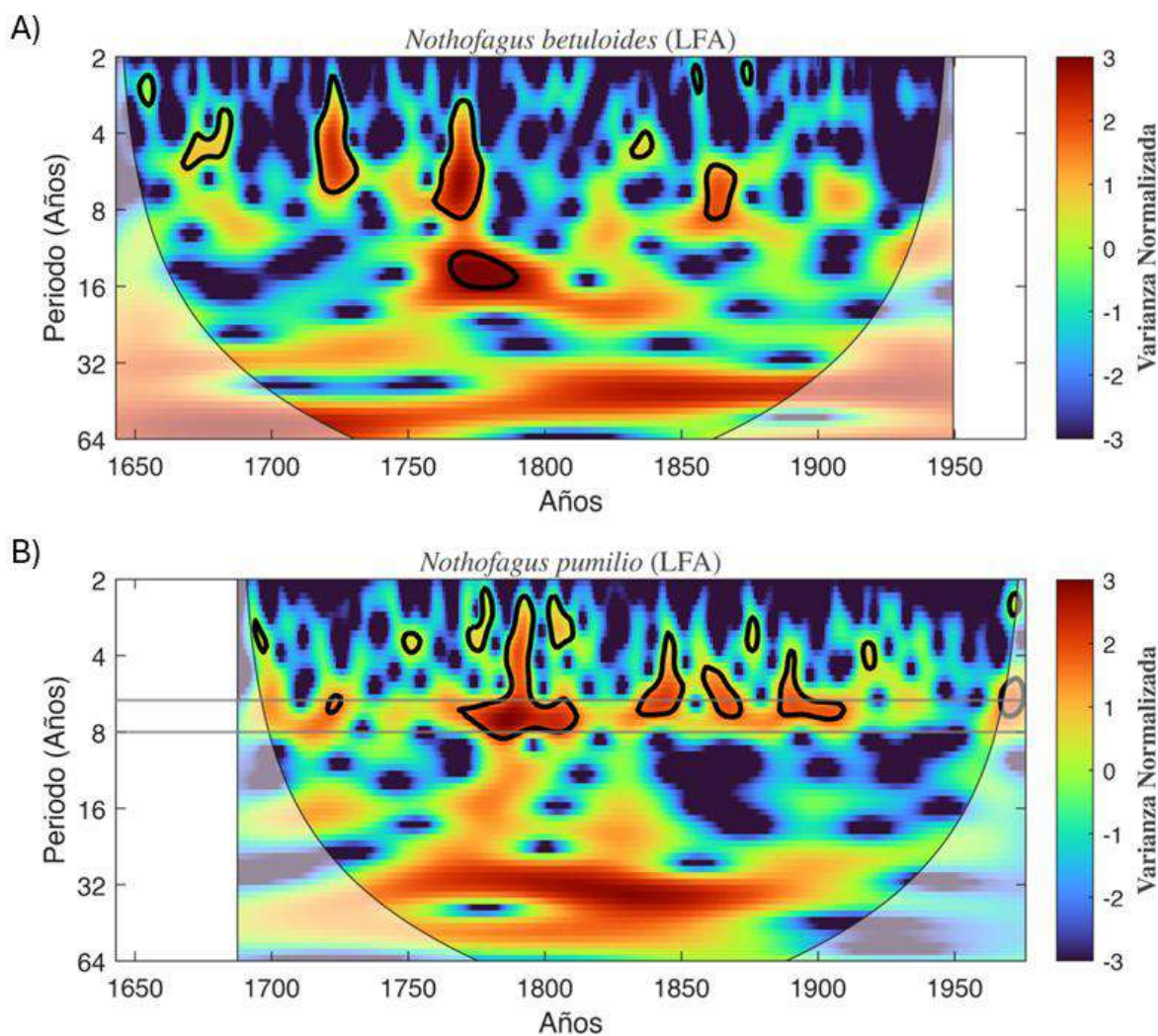
Las cronologías de ancho de anillo en su versión estándar y residual para *N. pumilio* en el sitio de Lago Fagnano se presentan en la figura 8. Al igual que en la cronología de *N. betuloides*, se graficó un spline de 10 años con la finalidad de resaltar las oscilaciones de baja frecuencia y así, poder observar las variaciones decadales en el crecimiento radial. Durante los más de tres siglos de extensión de la cronología, se distingue una marcada variación interanual en el crecimiento con valores que fluctúan bajo y sobre la media. En cuanto a las variaciones decadales en el crecimiento de *N. pumilio*, se visualizan intervalos temporales extensos de crecimiento bajo la media como al comienzo de la cronología en el periodo 1610-1618 que coincide con un bajo número de series, luego en los periodos 1637-1663, 1699-1763 y desde 1914 hacia el presente cuyo tramo final muestra una disminución importante en el crecimiento radial, que de igual forma es consistente con una menor profundidad de series. Con respecto a las variaciones que están por encima de la media, destacan los periodos 1682-1698, 1765-1838, donde se encuentran los valores de crecimiento de ancho de anillo más altos y finalmente el periodo 1890-1907 (figura 8).



**Figura 8.** Cronología de ancho de anillos de *N. pumilio* para el sitio de Lago Fagnano en su versión estándar (A) y residual (B). Líneas rojas señalan una curva de spline suavizado en 10 años. Eje Y izquierdo: índice de ancho de anillo (RWI). Eje Y derecho: número de muestras.

### 3.2. Análisis de Wavelet para *N. betuloides* y *N. pumilio*

El análisis de wavelet aplicado a las cronologías de ancho de anillo permitió caracterizar la variabilidad de los patrones de crecimiento radial a distintas escalas temporales en ambas especies. En la figura 9A para *N. betuloides*, se aprecian varianzas significativas en escalas interdecadales, con periodicidades que oscilan entre 4 y 8 años a comienzos y fines del siglo XVIII, sin embargo, estas señales se presentan de manera discontinua a lo largo del registro temporal. En contraste, en la figura 9B, *N. pumilio* evidencia varianzas significativas concentradas a una escala interdecadal cercana a los 7 años, mostrando ciclos más continuos a lo largo del período analizado (1688-1976).

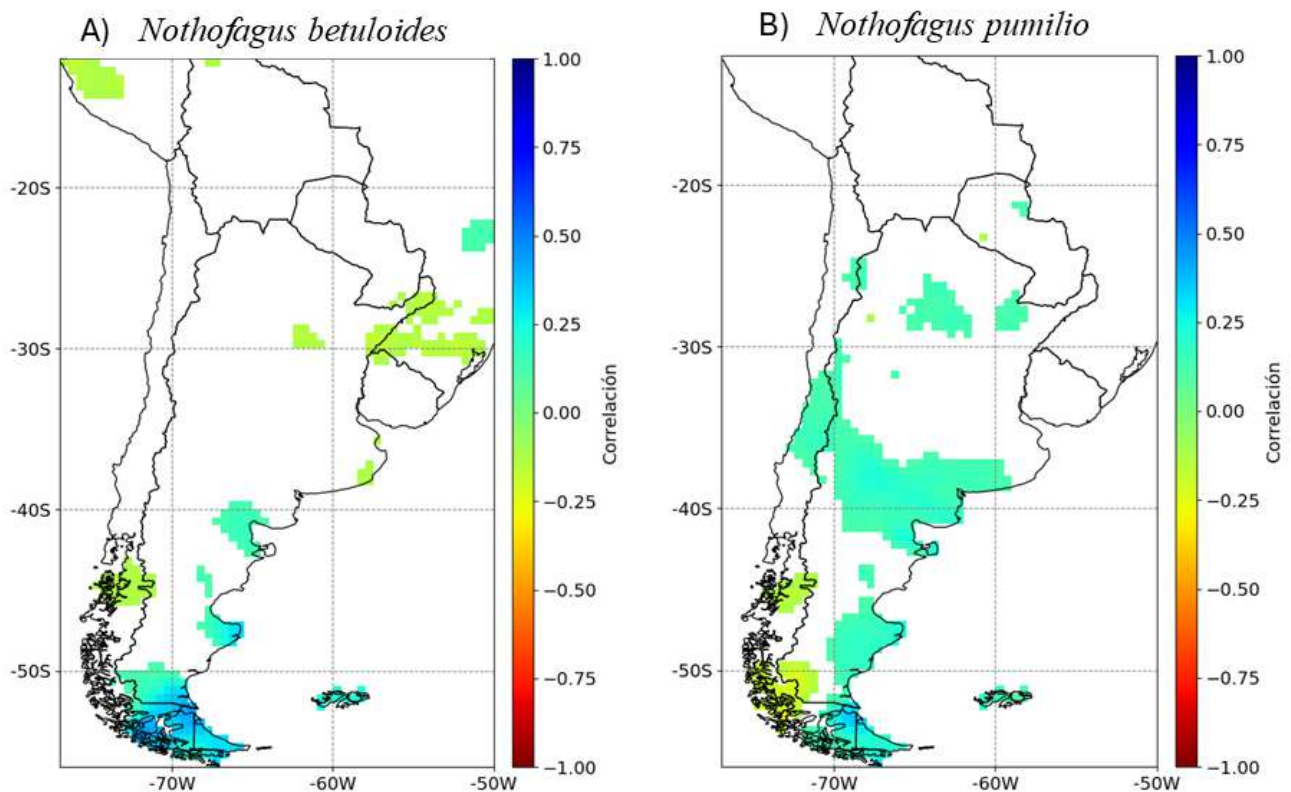


**Figura 9.** Análisis de Wavelet para la especie *N. betuloides* (A) en el periodo común 1643-1943 y para *N. pumilio* (B) en el periodo común 1688-1976 del sitio Lago Fagnano. En ambas especies se utilizaron las cronologías estándar y se consideraron el periodo con más de 10 series.

### 3.3. Relación entre el Atlas de Sequías de Sudamérica (SADA) y las cronologías de las especies estudiadas

La figura 10 muestra el mapa de correlación entre el Índice de Severidad de Sequía de Palmer (PDSI) y las cronologías estándar desarrolladas para *N. betuloides* y *N. pumilio*, correspondiente a los periodos comprendidos entre 1643-1949 y 1688-1976, respectivamente. Las correlaciones obtenidas son positivas significativas para ambas especies, indicando que, en condiciones de mayor humedad,

reflejadas por valores elevados del PDSI, se asocian a un incremento del crecimiento radial en *N. betuloides* y *N. pumilio*.

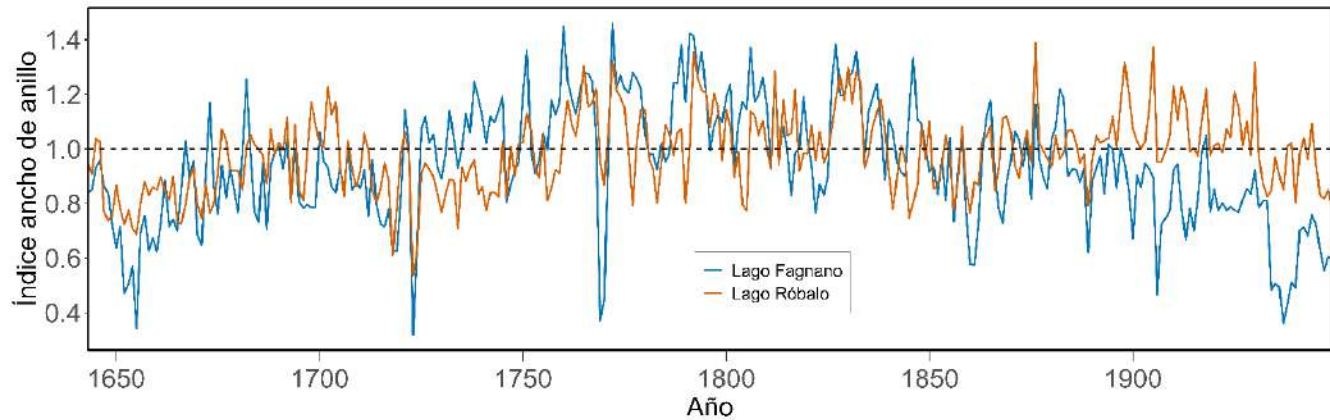


**Figura 10.** Mapa de correlación entre el Atlas de sequías de Sudamérica (SADA) las cronologías estándar desarrolladas del sitio Lago Fagnano: *N. betuloides* (A), para el periodo común 1643-1949 y *N. pumilio* (B), para el periodo común 1688-1976. Obtenido del Explorador del Atlas de Sequías de Sudamérica (<https://sada.cr2.cl/>).

### 3.4. Comparación de la cronología de ancho de anillo de *N. betuloides* sitio Lago Fagnano con cronología sitio Lago Róbal, Isla Navarino

La cronología de ancho de anillos de *N. betuloides* desarrollada para el sector de Lago Róbal, en Isla Navarino, abarca un periodo de 525 años, entre 1489 y 2008. El número de series muestra una marcada variación a lo largo del registro, alcanzando un mínimo de sólo 2 series en los años 1489 y 1490 y un máximo de 95 series en 1860. Hacia el tramo final, la cronología conserva una buena representatividad, con 14 series entre los años 2002 y 2008. Las cronologías estándar y residual se presentan en la figura 12, donde, al igual que en la cronología elaborada para el sitio Lago Fagnano, se aplicó un spline de 10 años.

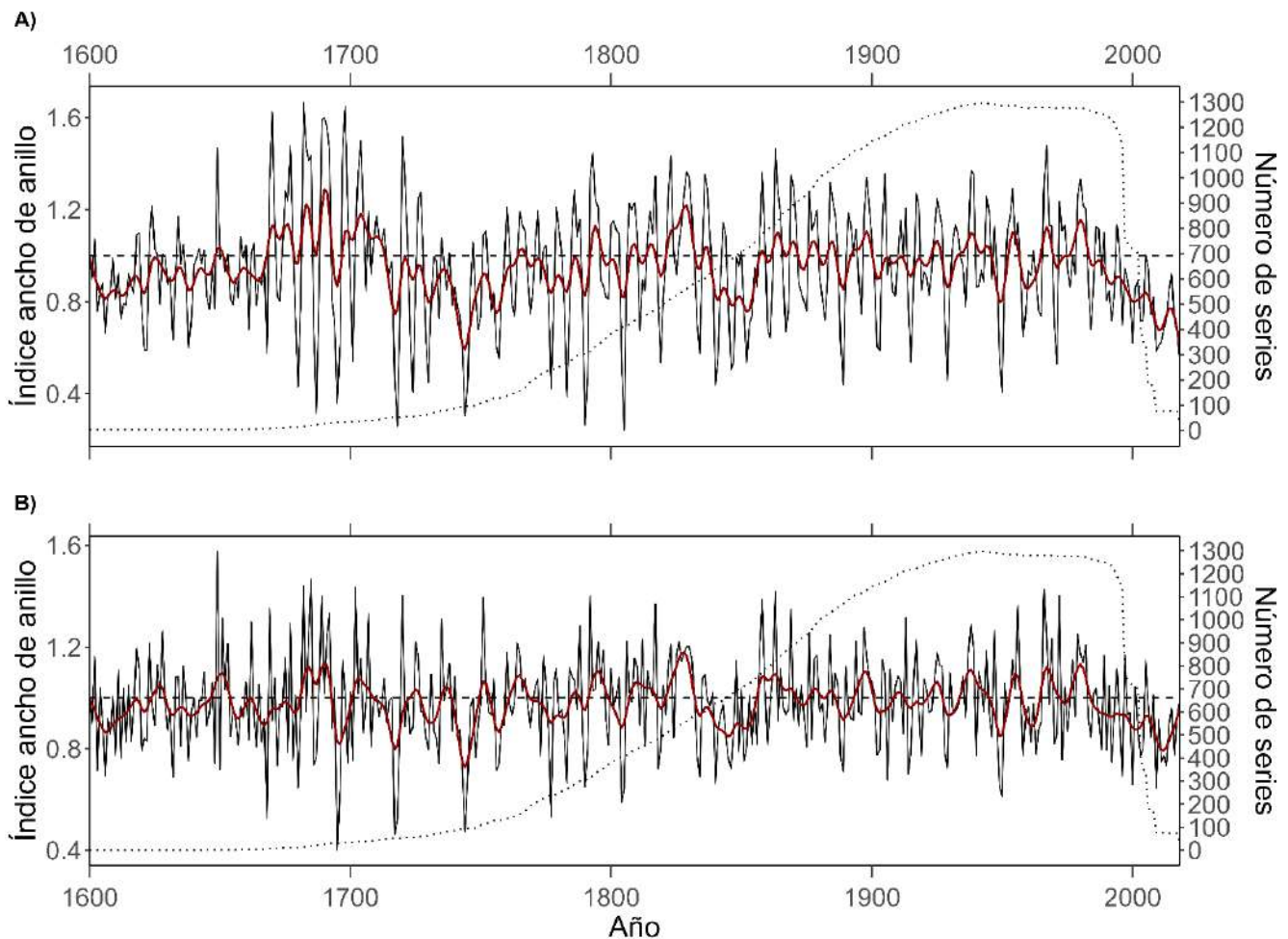
Con las cronologías de ancho de anillo de *N. betuloides* desarrolladas para los sitios Lago Fagnano y Lago Róbalo (Llancabure 2011), se realizó una comparación durante el periodo común entre 1643 y 1949 de las cronologías en su versión estándar (figura 11). La correlación entre ambas cronologías es de 0,41 ( $p < 0,001$ ), mostrando una tendencia general similar a lo largo del registro y fluctuaciones comunes en gran parte del periodo analizado, lo que evidencia una coherencia temporal en los patrones de crecimiento entre ambos sitios.



**Figura 11.** Comparación entre las cronologías estándar de ancho de anillos de *N. betuloides* obtenidas para los sitios Lago Fagnano (celeste) y cronología regional (naranja). El análisis contempla el periodo común 1643-1949.

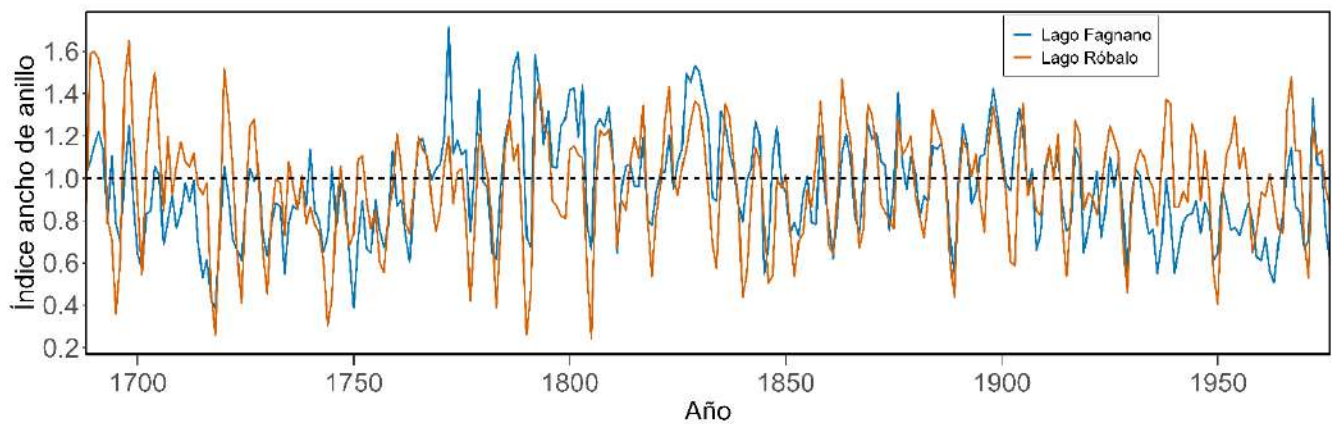
### 3.5. Comparación de la cronología de ancho de anillo de *N. pumilio* sitio Lago Fagnano con cronología regional.

La cronología regional de ancho de anillo de *N. pumilio* se extiende desde el año 1600 hasta 2018, logrando un rango temporal de 418 años. A lo largo del registro se observa un aumento progresivo del número de series, con valores mínimos en el primer siglo y un aumento sostenido de series hacia el tramo central de la cronología. Hacia el presente, la cronología regional alcanza un máximo de 1298 series en el año 1943. En los años finales del registro, la profundidad de series disminuye, pero manteniendo una alta representatividad con 35 series para el año 2018. En la figura 12 se presentan las versiones estándar y residual de la cronología regional de ancho de anillo de *N. pumilio*, para lo cual se aplicó un spline de 10 años en cada cronología.



**Figura 12.** Cronología regional de ancho de anillos de *N. pumilio* en su formato estándar (A) y residual (B). Líneas rojas señalan una curva de spline suavizado en 10 años. Eje Y izquierdo: índice de ancho de anillo (RWI). Eje Y derecho: número de muestras.

A partir de las cronologías de ancho de anillo de *N. pumilio* correspondientes al sitio Lago Fagnano y la cronología regional, se efectuó una comparación conjunta de las cronologías en su versión estándar, presentada en la figura 13. Esta comparación abarca un periodo de 288 años, entre 1688 y 1976. En función de ello, la cronología regional fue ajustada a este mismo rango temporal. La correlación entre ambas cronologías arrojó un valor de 0,57 ( $p < 0,001$ ), lo que refleja una señal compartida consistente a lo largo del registro, con variaciones interanuales coincidentes durante gran parte del periodo analizado. Este resultado indica una alta coherencia temporal en los patrones de crecimiento entre las cronologías comparadas.



**Figura 13.** Comparación entre las cronologías estándar de ancho de anillos de *N. pumilio* obtenidas para el sitio Lago Fagnano (celeste) y la cronología regional (naranja). El análisis contempla el periodo común 1688-1976.

## 4. DISCUSIÓN

### 4.1. Construcción de las cronologías flotantes

En el presente estudio se evaluó el potencial de la madera relicta a través de la construcción de cronologías flotantes de dos de las especies dominantes presentes en los bosques subantárticos en Tierra del Fuego, como *N. betuloides* y *N. pumilio*. Complementariamente, se analizaron sus patrones de crecimiento radial evaluando la coherencia en la señal con otras cronologías desarrolladas en la región. Se identificó que ambas especies presentan variaciones interanuales en el crecimiento radial durante todo el periodo (figura 5 y figura 8), comprobando su alta sensibilidad a las variables climáticas características del extremo sur de Sudamérica.

La generación de nuevas cronologías en Tierra del Fuego adquiere alta relevancia para la dendrocronología en el extremo austral de Sudamérica, dado que el uso de maderas relictas, en este caso, de especies del género *Nothofagus* ha sido escasamente explorado en la Patagonia chilena. Previamente, solo se registra la investigación realizada por Llancabure (2011). Mientras que, la Patagonia argentina documenta las investigaciones con material subfósil realizadas por Boninsegna et al. (1989) y Roig et al. (1996).

Si bien, el objetivo principal de las cronologías flotantes es extender los registros dendroclimáticos hacia el pasado (Roig et al 1996), en esta investigación no fue posible con ninguna de las dos especies estudiadas. La cronología de ancho de anillo para *N. betuloides* abarca un periodo entre 1592-2013, mientras que la cronología a nivel regional más extensa fue desarrollada por Llancabure (2011) y

comprende el periodo entre 1489-2008. Para el caso de *N. pumilio* la extensión de la cronología construida considera el periodo de 1610-2010, que es menor al periodo de la cronología regional utilizada para evaluar la coherencia en la señal de crecimiento, que comprende el periodo 1600-2018. Sin embargo, tanto en la cronología de *N. betuloides* como la cronología de *N. pumilio*, se robustece el número de series individuales de ancho de anillos en el periodo 1600-1700, información que resulta útil para el desarrollo de futuras cronologías.

Entre las muestras de *N. betuloides* y *N. pumilio*, de un total de 41 rodela, 38 de ellas cofecharon, correspondiente a un 93%, valor similar al obtenido por Llancabure (2011) que obtuvo un 94% de rodela cofechadas, lo que demuestra el potencial de las maderas relictas de *N. betuloides* y *N. pumilio* para realizar reconstrucciones ambientales pasadas en Tierra del Fuego.

La intercorrelación entre las series de ancho de anillo obtenidas en este estudio alcanza valores elevados para ambas especies, con 0,56 en *N. betuloides* y 0,57 en *N. pumilio* (cuadro 1), lo que evidencia una alta coherencia en los patrones de crecimiento radial entre los individuos muestreados. En el caso de *N. betuloides*, el valor obtenido es comparable a los reportados en investigaciones previas realizadas en el sur de Chile y Argentina, tales como el estudio de Llancabure (2011) en Lago Róbalo, que registró una intercorrelación de 0,52, y el trabajo de Castellano et al. (2019) en el sector de Lago del Desierto, en el sur de la Patagonia argentina, con un valor de 0,48. De manera similar, la intercorrelación observada para *N. pumilio* se sitúa dentro del rango descrito por estudios anteriores, como el realizado por Álvarez et al. (2015) en los Andes al norte de la Patagonia, con un valor de 0,48, y nuevamente por Castellano et al. (2019) en Lago del Desierto, donde se reportó una intercorrelación de 0,55.

Cabe destacar que, tanto al inicio como al final del período analizado, ambas cronologías presentan una menor representatividad en el número de series, lo que limita la robustez de la señal común en esos tramos temporales. En el caso de *N. betuloides*, esta menor profundidad muestral podría explicar que no se observa la tendencia a la disminución del crecimiento radial desde mediados del siglo XX hacia el presente, documentada a nivel regional por Llancabure (2011), Villalba et al. (2012), Soto y Aravena (2017) y Fuentes et al. (2018). Algo similar ocurre con *N. pumilio*, dado que investigaciones realizadas en el rango latitudinal en que se encuentra el sitio de estudio de Lago Fagnano, como las de Aravena et al. (2002) y Lara et al. (2005), evidencian un incremento sostenido del crecimiento radial por sobre la media a partir de 1950 aproximadamente, patrón que no se manifiesta de manera consistente en la cronología desarrollada en este estudio. Fuentes et al. (2018) indica que una señal climática mejora con una mayor replicación de series, lo que refuerza la importancia de considerar la profundidad muestral y la representatividad temporal al interpretar patrones de crecimiento radial.

La muestra más longeva de *N. pumilio* registrada en este estudio alcanzó una edad de 346 años, representando casi el tiempo de vida máximo reportado para la especie en la Patagonia, estimado en aproximadamente 400 años según la literatura (Frangi et al. 2004, Donoso 2006). En contraste, la muestra más longeva de *N. betuloides* alcanzó una edad de 286 años, valor considerablemente inferior a la longevidad máxima estimada para la especie, la cual puede superar los 600 años (Donoso 2006, Promis 2008). Estos resultados indican que el material subfósil analizado incluye individuos de edad avanzada que se han logrado conservar en buen estado a lo largo del tiempo, a pesar de las condiciones ambientales extremas características de la Patagonia chilena y argentina.

El análisis de *wavelet* evidencia diferencias claras en la estructura temporal de la variabilidad del crecimiento radial entre ambas especies. En *N. betuloides*, las señales significativas se concentran en escalas interdecadales, con periodicidades entre 4 y 8 años, pero se presentan de forma discontinua a lo largo del registro, lo que sugiere una respuesta episódica particular a forzantes ambientales variables en el tiempo (figura 9A). En contraste, *N. pumilio* muestra una señal dominante y persistente cercana a los 7 años, presente de manera continua durante gran parte del período analizado (1688–1976), la cual coincide con una reducción del crecimiento radial (Figura 9B). Este patrón es consistente con la ciclicidad ampliamente documentada para la especie en Isla Navarino y Tierra del Fuego, tal como lo reportan Roig et al. (1996), Aravena et al. (2002), Massaccesi et al. (2008) y Matskovsky et al. (2019). Asimismo, estos episodios de ciclicidad son más frecuentes durante el siglo XIX, ajustándose con los resultados obtenidos por Matskovsky et al. (2019).

Si bien los autores mencionados proponen que este ciclo de aproximadamente 7 años estaría condicionado en gran medida por la interacción entre variables climáticas y factores biológicos, tales como características fisiológicas propias de la especie o brotes de insectos defoliadores, este último factor ha sido profundizado por Matskovsky et al. (2019), quienes confirmaron estadísticamente que dicha ciclicidad se atribuye principalmente a episodios de defoliación por insectos. No obstante, los autores señalan que no fue posible comprobar de manera concluyente que estos episodios afecten directamente el crecimiento radial de *N. pumilio*. Asimismo, indican que una de las principales limitantes para evaluar esta hipótesis es la falta de un seguimiento sistemático y continuo de los eventos de defoliación, lo que impide comparar directamente las series temporales de defoliación con las series de disminución del ancho de anillo. De igual manera, el estudio sugiere que las variaciones climáticas podrían influir en la dinámica de las poblaciones de insectos, lo que, a su vez, impactaría el crecimiento radial de los árboles.

Las correlaciones positivas observadas entre las cronologías de ambas especies y el Índice de Severidad de Sequía de Palmer (PDSI) del Atlas de Sequías de Sudamérica indican que, bajo condiciones

más húmedas, tanto *N. betuloides* como *N. pumilio* se asocian a un incremento del crecimiento radial al sur de la Patagonia. Este patrón sugiere que, aun en un contexto climático caracterizado por frentes polares, fuertes precipitaciones y, principalmente vientos fuertes y persistentes (Boninsegna et al., 2009), la disponibilidad hídrica del suelo constituye un factor relevante para el crecimiento de *N. betuloides* y *N. pumilio*

#### 4.2. Comparación entre las cronologías flotantes de Lago Fagnano y cronologías existentes

La comparación entre la cronología de *N. betuloides* desarrollada en Lago Fagnano y la cronología de Lago Róbalo (Llancabure 2011) evidencia una correlación positiva y significativa, demostrando una coherencia temporal robusta en los patrones de crecimiento entre ambos sitios. No obstante, en el tramo final de la cronología de Lago Fagnano, a partir del año 1896 aproximadamente, *N. betuloides* presenta un crecimiento con valores bajo la media respecto a los registrados en Lago Róbalo, lo cual, puede ser atribuido a las características locales del sitio o bien, por diferencias en el número de series de ancho de anillo que componen ambas cronologías durante dicho periodo, con una menor replicación de series en la cronología de Lago Fagnano.

Adicionalmente, en la cronología de *N. betuloides* desarrollada en Lago Fagnano se identificaron disminuciones abruptas del crecimiento radial en los años 1723 y 1769 (figura 11), en contraste con el patrón observado en la cronología de Lago Róbalo, las que tampoco se presentan en la cronología de *N. pumilio*. Estas disminuciones marcadas en el crecimiento bajo la media podrían reflejar la influencia de factores no climáticos que afectaron a la especie, potencialmente asociado a disturbios externos, como eventos sísmicos. En un sector adyacente al área de estudio, donde se sitúa el Lago Fagnano, se encuentra el sistema de fallas Magallanes-Fagnano, que atraviesa la Isla Grande de Tierra del Fuego (Onorato et al, 2020). Estudios han documentado que los terremotos pueden generar respuestas puntuales en el crecimiento radial de los árboles, tales como supresiones abruptas en el crecimiento de ancho de anillo, como consecuencia de daños directos, alteraciones en el sistema radical, cambios en la estabilidad del sustrato o modificaciones geomorfológicas inducidas por el sismo (Jacoby, 1997; Bekker, 2010). No obstante, si bien se observan disminuciones abruptas en años específicos, se requiere más investigación para relacionar de manera robusta estos años en particular con eventos sísmicos.

En el sitio de estudio, *N. betuloides* presenta una mayor variabilidad en el crecimiento de ancho de anillo, con una sensibilidad media de 0,23 (cuadro 1), en comparación con la cronología desarrollada por Llancabure (2011), que registró una sensibilidad media de 0,14. En contraste, los valores de sensibilidad

media obtenidos en este estudio son similares a los reportados por Villalba et al. (2012) para el mismo sitio de estudio, quienes registraron una sensibilidad media de 0,20, valor que también fue documentado por Soto-Rogel y Aravena (2017).

Algo similar ocurre con la comparación de la cronología de *N. pumilio* y la cronología regional, puesto que, muestra una fuerte compatibilidad en los patrones de crecimiento, también con una correlación positiva y significativa. Asimismo, los valores de sensibilidad media de *N. pumilio* en el sitio de estudio alcanzan 0,27 (cuadro 1), situándose dentro del rango reportado para estudios realizados en el sur de la Patagonia y Tierra del Fuego, cuyos valores fluctúan entre 0,19 y 0,36 (Aravena et al. 2002, Lara et al. 2005).

En ambas cronologías comparativas, esta fuerte señal común del crecimiento radial sugiere que tanto *N. betuloides* como *N. pumilio* registran forzantes ambientales comunes a escala regional, a pesar de las diferencias locales en condiciones topográficas de micrositos y condiciones climáticas.

La existencia de una señal común robusta en las cronologías de *N. betuloides* y *N. pumilio*, evidenciada por alto porcentaje de muestras cofechadas, valores altos de intercorrelación y sensibilidad media, demuestra el alto potencial de las maderas relictas como registro paleoambiental confiable para la reconstrucción climática y de las condiciones ambientales pasadas de crecimiento en Tierra del Fuego. Aun cuando las cronologías flotantes desarrolladas no logran extender los registros existentes más allá de las cronologías regionales disponibles, los resultados confirman que la madera subfósil conserva de manera consistente la señal climática a nivel interanual y decadal, incluso bajo condiciones ambientales extremas propias del extremo austral de Sudamérica.

De acuerdo con los resultados obtenidos y lo reportado en investigaciones previas a escala regional, se reconoce que las cronologías de *N. betuloides* y *N. pumilio* constituyen herramientas relevantes para el análisis de la variabilidad climática pasada en la Patagonia austral. Se ha demostrado que el crecimiento radial, dependiendo de la especie, responde de manera significativa a la temperatura, las precipitaciones, la disponibilidad hídrica y forzantes atmosféricos de gran escala, como el SAM, lo que ha permitido su uso como proxy para reconstrucción de variables climáticas (Aravena et al. 2002, Lara et al. 2005, Villalba et al. 2012, Soto y Aravena 2017). En este sentido, las cronologías flotantes desarrolladas en Lago Fagnano aportan una base dendrocronológica que permite proyectar futuras reconstrucciones paleoambientales orientadas a contextualizar los cambios climáticos recientes dentro de una variabilidad de largo plazo, especialmente en una región caracterizada por la escasez de registros instrumentales y la alta sensibilidad de sus ecosistemas frente al cambio climático (Soto y Aravena 2017).

## CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos permiten inferir que la madera relicta de *N. betuloides* y *N. pumilio* presente en el sector de Lago Fagnano posee un alto potencial dendrocronológico, haciendo posible el desarrollo de cronologías flotantes de ancho de anillos para ambas especies. Las cronologías construidas presentan una extensión multicientenaria continua en el tiempo (1592-2013 en *N. betuloides* y 1610- 2005 en *N. pumilio*), con elevados porcentajes de series cofechadas, y un índice EPS superior al umbral de confiabilidad en amplios tramos temporales. Asimismo, el análisis de wavelet reveló diferencias en la estructura temporal del crecimiento radial, destacando en *N. pumilio* la persistencia de un ciclo cercano a los 7 años ampliamente documentado para la región.

El análisis de los patrones de crecimiento radial evidenció que las cronologías flotantes desarrolladas para *N. betuloides* y *N. pumilio* presentan una señal común robusta y coherente con otros registros multicientenales de la región, confirmando que ambas especies responden a forzantes ambientales de escala regional. La comparación con otras cronologías obtuvo correlaciones positivas y significativas, lo que indica una sincronía temporal en las variaciones del crecimiento radial. Estos resultados confirman que las cronologías flotantes desarrolladas conservan una señal climática y ambiental consistente, reforzando su utilidad como registros paleoambientales.

## REFERENCIAS

- Álvarez C, T Veblen, D Christie, A 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: 112-121.
- Amoroso MM, LD Daniels, R Villalba, P Cherubini. 2015. Does drought incite tree decline and death in *Austrocedrus chilensis* forests? *Journal of Vegetation Science* 26(6): 1171-1183.
- Aravena JC, A Lara, A Wolodarsky-Franque, R Villalba, E Cuq. 2002. Tree-ring growth patterns and temperature reconstruction from *Nothofagus pumilio* (Fagaceae) forests at the upper tree line of southern Chilean Patagonia. *Revista Chilena de Historia Natural* 75: 361-376.
- Bahamóndez V, R Sagardía Parga, J Rose. 2020. El bosque nativo en Chile. Resultados del Inventario Forestal Nacional período 2001-2015. Instituto Forestal (INFOR). 59 p.

- Bernabei M, N Macchioni. 2012. La datación dendrocronológica en el estudio de los edificios históricos. *Loggia, Arquitectura & Restauración* 24–25: 104-111.
- Boninsegna JA, J Argollo, JC Aravena, J Barichivich, D Christie, M Ferrero, A Lara, C Le Quesne, B Luckman, M Masiokas, M Morales, J Oliveira, FA Roig, A Srur, R Villalba. 2009. Dendroclimatological reconstructions in South America: A review. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 281: 210-228.
- Bunn A. 2008. A dendrochronology program library in R (dplR). *Dendrochronologia* 26(2): 115-124.
- Castellano PL, AM Srur, LO Bianchi. 2019. Climate-growth relationships of deciduous and evergreen *Nothofagus* species in southern Patagonia, Argentina. *Dendrochronologia* 58: 125646.
- Collado L, S Farina. 2006. El bosque de Tierra del Fuego. Caracterización, regiones ecológicas, actividad forestal, problemáticas y desafíos actuales. Subsecretaría de Recursos Naturales, Dirección de Bosques, Ushuaia.
- Cook ER, RL Holmes. 1996. Guide for computer program ARSTAN. En: HD Grissino-Mayer, RL Holmes, HC Fritts (eds.), *The International Tree-Ring Data Bank Program Library Version 2.0 User's Manual*. Laboratory of Tree-Ring Research, University of Arizona, Tucson, pp. 75-87.
- Donoso C. 2006. Las especies arbóreas de los bosques templados de Chile y Argentina: Autoecología. Marisa Cuneo, Valdivia, Chile, pp. 486-500.
- Fernández C. 2021. Cambios del área del glaciar Grey, Parque Nacional Torres del Paine, y su estudio a través de la climatología y la dendrocronología. Tesis de pregrado, Universidad de Chile, Santiago, Chile. 75 p.
- Frangi JL, MD Barrera, J Puig Fábregas, PF Yapura, AM Arambarri, LL Richter. 2004. Ecología de los bosques de Tierra del Fuego. En MF Arturi, JL Frangi, y JF Goya (Eds.), *Ecología y manejo de los bosques de Argentina*, pp. 1-88.
- Fritts HC. 1976. *Tree rings and climate*. Academic Press, New York, 576 p.
- Fuentes M, JC Aravena, A Seim, HW Linderholm. 2018. Assessing the dendroclimatic potential of *Nothofagus betuloides* (Magellan's beech) forests in the southernmost Chilean Patagonia. *Trees* 33: 557-575.

- Gerding V, O Thiers. 2002. Caracterización de suelos bajo bosques de *Nothofagus betuloides* (Mirb.) Blume, en Tierra del Fuego, Chile. *Revista Chilena de Historia Natural* 75(4): 819-833.
- Gutiérrez E, VR Vallejo, J Romaña, J Fons. 1991. The subantarctic *Nothofagus* forests of Tierra del Fuego: distribution, structure and production. *Oecologia Aquatica* 10: 351-366.
- Gutiérrez E. 2009. La dendrocronología: métodos y aplicaciones. En: X Nieto, MA Cau (eds.), *Arqueología náutica mediterránea*, pp. 309-322.
- Gutiérrez Caro B, H Grosse Werner, I Moya Navarro, S Salinas, B Acuña Aroca, V Díaz. 2022. Crecimiento de lenga (*Nothofagus pumilio* (Poepp. & Endl.) Krasser) en un ensayo de progenies y procedencias de 22 años en la Reserva Nacional Coyhaique, Chile. *Ciencia & Investigación Forestal* 28(2): 47-55.
- Holmes R. 1983. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin* 43: 69-75.
- Köppen W, R Geiger. 1936. Handbuch der Klimatologie. Band 1. Teil C: Klima klassifikation. Gebrüder Borntraeger.
- Lara A, R Villalba, A Wolodarsky-Franke, JC Aravena, BH Luckman, E Cuq. 2005. Spatial and temporal variation in *Nothofagus pumilio* growth at treeline along its latitudinal range (35°40'–55° S) in the Chilean Andes. *Journal of Biogeography* 32: 879-893.
- Le Quesne C, DW Stahle, MK Cleaveland, MD Therrell, JC Aravena, J Barichivich. 2014. Ancient *Austrocedrus* tree-ring chronologies used to reconstruct past climate variability in Patagonia. *Geophysical Research Letter* 31(6): L06202.
- Llancabure J. 2011. Relaciones entre el crecimiento de *Nothofagus betuloides* y el clima local y de gran escala en bosques subantárticos de la Isla Navarino. Tesis de Pregrado, Universidad Austral de Chile, Valdivia. 30 p.
- Loewe V, C López, G Pineda Bravo, M Toral Ibáñez, E Urquieta. 1998. Monografía de Lenga, *Nothofagus pumilio*: potencialidad de especies y sitios para una diversificación silvícola nacional. Instituto Forestal (INFOR), Corporación Nacional Forestal (CONAF) y Fundación para la Innovación Agraria (FIA). 103 p.
- Mallat S. 1998. A Wavelet Tour of Signal Processing. Academic Press.

- Masiokas MH, A Rabatel, A Rivera, L Ruiz, P Pitte, JL Ceballos, S MacDonell. 2020. A review of the current state and recent changes of the Andean cryosphere. *Frontiers in Earth Science*, 8: 99.
- Massaccesi G, FA Roig, GJ Martínez Pastur, MD Barrera. 2008. Growth patterns of *Nothofagus pumilio* trees along altitudinal gradients in Tierra del Fuego, Argentina. *Trees* 22(2): 245-255.
- Matskovsky V, FA Roig, GM Pastur. 2019. Removal of a non-climatically induced seven-year cycle from *Nothofagus pumilio* tree-ring width chronologies from Tierra del Fuego, Argentina for their use in climate reconstructions. *Dendrochronologia* 57: 125610.
- Molina L, MB Pildain. 2022. Sanidad de los bosques de *Nothofagus*. Caracterización de sitio y organismos asociados a la muerte agrupada. Tesis de doctorado. Universidad de Buenos Aires. 282 p.
- Morales MS, R Villalba, ER Cook, DA Christie, JC Espinoza, Á González-Reyes, C LeQuesne, AA Muñoz, L Parra-Rojas, C Villarroel, T Kitzberger, A Lara, JA Boninsegna, J Barichivich, AM Srur, ME Ferrero, J Palmer, J Astudillo, JC Aravena, ... South American Drought Atlas Contributors. 2020. Six hundred years of South American tree rings reveal an increase in severe hydroclimatic events. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 117, 16816-16823. <https://doi.org/10.1073/pnas.2002411117>
- Onorato MR, LPA Perucca, AMJ Coronato, R López, PA Blanc. 2019. Evidencias morfotectónicas en el sistema de fallas Magallanes–Fagnano, borde transformante entre las placas Sudamericana y Scotia, Isla Grande de Tierra del Fuego, Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 77(1): 47-61.
- Pisano E. 1977. Fitogeografía de Fuego-Patagonia chilena. I. Comunidades vegetales entre las latitudes 52° y 56° S. *Anales del Instituto de la Patagonia (Chile)* 8: 121-250.
- Promis A, G Cruz, A Reif, S Gärtner. 2008. Bosques de *Nothofagus betuloides* (Mirb.) Oerst. 1871 (Fagales: Nothofagaceae) en la Patagonia Austral y Tierra del Fuego. *Anales del Instituto de la Patagonia* 36: 53-68.
- Promis A. 2013. Aspectos de la ecología de la regeneración de *Nothofagus betuloides* para una propuesta de manejo forestal sustentable en bosques patagónicos. En *Silvicultura en Bosques Nativos. Avances en la investigación en Chile, Argentina y Nueva Zelandia*, pp. 81-100.

- R Core Team. 2022. R: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing.
- Roig FA, C Roig, J Rabassa, JA Boninsegna. 1996. Fuegian floating tree-ring chronologies from subfossil *Nothofagus* woods. *Holocene* 6: 469-476.
- Serrano-León H, D 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.
- Schulman E. 1956. Dendroclimatic Changes in semiarid América. University of Arizona Press. Tucson.
- Schweingruber F. H. 1996. Tree Rings and Environment. Dendroecology. Birmensdorf, Swiss Federal Institute for forest, Snow and Landscape Research. Berne, Stuttgart, Vienna, Haupt. 609 p.
- Soto-Rogel P, JC Aravena. 2017. Potencial dendroclimático de *Nothofagus betuloides* en la Cordillera de Darwin, Tierra del Fuego, Chile. *Bosque (Valdivia)* 38(1): 155-168.
- Stokes, M., and Smiley, T. 1968. An Introduction to Tree-Ring Dating. The University of Chicago Press.
- Thiers O, V Gerding. (2007). Variabilidad topográfica y edáfica en bosques de *Nothofagus betuloides* (Mirb) Blume, en el suroeste de Tierra del Fuego, Chile. *Revista chilena de historia natural* 80(2): 201-211.
- Torrence C, GP Compo. 1998. A practical guide to wavelet analysis. *Bulletin of the American Meteorological society* 79(1): 61-78.
- Veblen T, C Donoso, T Kitzberger, A Rebertus. 1996. Ecology of Southern Chilean and Argentinean *Nothofagus* forests, pp. 293-353. In: TT Veblen, RS Hill y J Read (Eds.). The Ecology and Biogeography of Nothofagus Forests. Yale University Press, New Haven, USA.
- Villalba R, A Lara, MH Masiokas, R Urrutia, BH Luckman, GJ Marshall, IA Mundo, DA Christie, ER Cook, R Neukom, K Allen, P Fenwick, JA Boninsegna, AM Srur, MS Morales, D Araneo, JG Palmer, E Cuq, JC Aravena, A Holz, C LeQuésne. 2012. Unusual Southern Hemisphere tree growth patterns induced by changes in the Southern Annular Mode. *Nature Geoscience* 5: 793-798.

Wigley TM, KR Briffa, PD Jones. 1984. On the average value of correlated time series, with applications in dendroclimatology and hydrometeorology. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 23(2): 201-213.

## ANEXO

**Anexo 1:** Estadísticos descriptivos cronología de ancho de anillo *N. betuloides*

Serie	Inicio	Término	Años	Correlación	Media	Desviación estándar	Autocorrelación de primer orden
LFA101A	1860	2002	143	0,49	1,28	0,78	0,20
LFA101B	1860	2002	143	0,51	1,28	0,78	0,21
LFA102A	1592	1835	244	0,67	1,51	0,76	0,24
LFA102B	1592	1835	244	0,59	1,53	0,79	0,24
LFA126A	1622	1808	187	0,64	1,66	0,72	0,33
LFA126B	1622	1808	187	0,64	1,78	0,74	0,32
LFA131A	1650	1849	200	0,62	1,21	0,83	0,20
LFA131B	1650	1849	200	0,57	1,09	0,78	0,24
LFA135A	1636	1772	137	0,68	1,14	0,83	0,20
LFA135B	1636	1772	137	0,62	1,11	0,85	0,20
LFA136A	1745	2013	269	0,56	2,05	0,77	0,22
LFA136B	1745	2013	269	0,49	2,08	0,74	0,22
LFA138A	1643	1928	286	0,59	0,55	0,80	0,23
LFA138B	1643	1928	286	0,61	1,05	0,81	0,21
LFA143A	1789	1949	161	0,45	1,03	0,93	0,19
LFA143B	1789	1949	161	0,57	1,05	0,93	0,20
LFA149A	1706	1846	141	0,55	1,45	0,77	0,23
LFA149B	1706	1846	141	0,54	1,36	0,67	0,23
LFA152C	1650	1917	268	0,58	0,42	0,69	0,22
LFA152D	1647	1917	271	0,60	0,83	0,71	0,22
LFA153B	1684	1822	139	0,54	0,90	0,81	0,23
LFA153C	1684	1822	139	0,52	0,90	0,81	0,23
LFA157A	1619	1836	218	0,58	1,02	0,83	0,18
LFA157B	1619	1836	218	0,61	1,13	0,78	0,19
LFA158A	1658	1858	201	0,50	1,49	0,82	0,31
LFA158B	1658	1858	201	0,48	1,15	0,73	0,33
LFA168A	1706	1836	131	0,65	1,45	0,87	0,27
LFA168B	1706	1836	131	0,71	1,22	0,90	0,28
LFA169A	1682	1919	238	0,54	1,74	0,82	0,22
LFA169B	1682	1919	238	0,56	1,89	0,84	0,22
LFA171A	1826	1973	148	0,46	1,70	0,70	0,22
LFA171B	1826	1973	148	0,52	1,45	0,79	0,25
LFA185A	1702	1952	251	0,40	1,09	0,80	0,25
LFA185B	1702	1952	251	0,42	0,86	0,75	0,26
LFA202A	1765	1871	107	0,67	1,66	0,72	0,19
LFA202B	1765	1871	107	0,57	1,61	0,77	0,18

**Anexo 2:** Estadísticos descriptivos cronología de ancho de anillo *N. pumilio*

Serie	Inicio	Término	Años	Correlación	Media	Desviación estándar	Autocorrelación de primer orden
LFA104A	1610	1842	233	0,60	1,26	0,81	0,80
LFA104B	1610	1842	233	0,61	1,00	0,54	0,71
LFA108A	1833	1948	116	0,55	1,69	0,98	0,85
LFA108B	1833	1948	116	0,53	1,64	0,97	0,82
LFA111A	1802	1959	158	0,51	2,47	1,19	0,83
LFA111B	1802	1959	158	0,50	2,42	1,15	0,83
LFA113A	1802	1983	182	0,48	1,80	0,72	0,68
LFA113B	1802	1983	182	0,52	1,73	0,70	0,64
LFA121A	1616	1961	346	0,56	0,99	0,56	0,80
LFA121B	1616	1961	346	0,53	0,93	0,56	0,84
LFA123A	1750	2005	256	0,53	1,28	0,53	0,66
LFA123B	1750	2005	256	0,57	1,05	0,48	0,66
LFA129A	1714	1848	135	0,68	1,40	0,90	0,77
LFA129B	1714	1848	135	0,55	1,19	0,74	0,78
LFA132A	1763	1934	172	0,51	1,41	0,83	0,87
LFA132B	1763	1934	172	0,45	1,19	0,60	0,84
LFA140A	1669	1887	219	0,61	1,15	0,58	0,79
LFA140B	1669	1887	219	0,56	1,13	0,54	0,79
LFA145A	1716	1947	232	0,49	1,02	0,54	0,76
LFA145B	1716	1947	232	0,60	0,99	0,52	0,77
LFA159A	1831	1976	146	0,58	1,55	0,79	0,84
LFA159B	1831	1976	146	0,47	1,66	0,92	0,83
LFA161A	1683	1976	294	0,63	1,11	0,64	0,85
LFA161B	1683	1976	294	0,56	1,06	0,59	0,83
LFA163A	1830	1994	165	0,53	1,46	0,75	0,85
LFA163B	1830	1994	165	0,65	1,33	0,68	0,81
LFA165A	1856	1984	129	0,52	1,34	0,41	0,49
LFA165B	1856	1984	129	0,54	1,46	0,55	0,60
LFA167A	1688	1942	255	0,59	1,34	1,10	0,91
LFA167B	1688	1942	255	0,68	1,02	0,58	0,78
LFA173A	1722	1864	143	0,58	1,30	0,57	0,75
LFA173B	1722	1864	143	0,59	1,29	0,56	0,76
LFA175A	1762	1878	117	0,54	1,38	0,89	0,69
LFA175B	1762	1878	117	0,58	1,26	0,99	0,77
LFA193A	1802	1942	141	0,62	1,99	1,12	0,83
LFA193B	1802	1942	141	0,63	1,96	1,10	0,83
LFA197A	1840	1960	121	0,56	1,51	0,51	0,64
LFA197B	1840	1960	121	0,58	1,33	0,46	0,61
LFA201A	1767	1871	105	0,67	1,39	0,73	0,61
LFA201B	1767	1871	105	0,60	1,43	0,71	0,61