

Convocatoria de ayuda a proyectos de investigación liderados por jóvenes investigadores (9ª ed., 2019)

1. Datos de identificación.

Título de la propuesta	Buscando lo inesperado: Explorando <i>proxies</i> para determinar si el impacto de las heladas primaverales ha aumentado en los bosques caducifolios de los Andes Patagónicos.
Categoría	Ganando independencia
Nombre y apellidos del Beneficiario	Gabriel Sangüesa Barreda
Datos de contacto: e-mail y teléfono	gbsanguesa@gmail.com ; +34 676561440
Departamento/Instituto/Grupo de Investigación/Otros	Área de Biología Vegetal, Departamento de Ciencias Agroforestales, Escuela de Ingenierías Agrarias (EiFAB).
Dirección, código postal, provincia	Campus Duques de Soria, s/n. ES-42004, Soria.

2. Memoria Técnica. Actividades y resultados de investigación

2.1. Introducción (Planteamiento, objetivos y justificación)

Las bajas temperaturas durante la brotación de las especies caducifolias dañan los tejidos en formación. Esta perturbación de origen climático conlleva la movilización de gran parte de las reservas de carbono para reemplazar los tejidos afectados mediante una segunda foliación (Inouye 2000). Esto genera un desfase en la fenología con respecto a años sin daños por heladas, y, por lo tanto, una estación de crecimiento más corta (Gu et al. 2008), así como un crecimiento secundario anual inusualmente reducido (Principe et al. 2017; Dittmar et al. 2006). La transcendencia de estos impactos no solo es a nivel de productividad, sino que también incluye incidencias en la reproducción y la dinámica poblacional (Inouye 2000; Augspurger 2011).

El inicio de la fenología foliar es el resultado de maximizar la adquisición de carbono mediante la fotosíntesis evitando a su vez el periodo de mayor frecuencia e incidencia de heladas (Leinonen y Hänninen 2002). Por lo tanto, la vulnerabilidad a las bajas temperaturas depende principalmente de la estrategia específica de cada especie, algunas especies cuentan con una estrategia "más arriesgada", con una fenología más prematura, frente a otras "más conservadoras", con una fenología más tardía (Bigler y Bugmann 2018). Sin embargo, existe un amplio consenso de que el momento del despliegue de las hojas ha avanzado en respuesta a las temperaturas más cálidas durante el invierno y la primavera (Menzel et al. 2006; Jeong et al. 2011). Un período vegetativo más largo aumenta la productividad del bosque, pero también reduce los márgenes de seguridad para evitar eventos de heladas (Bigler y Bugmann 2018 ; Augspurger 2009, 2013). Además, el aumento de las temperaturas ha sido más importante en los bosques de mayor altitud, con un mayor avance de la fenología, y, por lo tanto, una mayor vulnerabilidad a los daños por heladas (Vitasse et al. 2018). Las proyecciones climáticas

predicen mayores fluctuaciones de temperatura intraanuales en las latitudes templadas (IPCC 2013), y un mayor riesgo asociado a heladas primaverales.

Asimismo, es esperable que los impactos de las heladas no sean homogéneos en todo el rango de distribución de las especies debido a: *i*) las peculiaridades del clima local (por ejemplo, la amplitud térmica), *ii*) del bosque (sitios de diferente elevación), *iii*) incluso a nivel de árbol (situación en el borde o en el centro), *iv*) y los cambios en la fenología asociados a estos factores (Charrier et al. 2015). Los impactos en áreas remotas pueden pasar desapercibidos ya que las defoliaciones inducidas por heladas solo son visibles durante un corto período de tiempo, hasta que se completa la segunda foliación. Sin embargo, el crecimiento radial inusualmente reducido en ese año o posibles anomalías en algunas de las características de la madera (por ejemplo, la densidad o su anatomía) pueden dejar una huella permanente que pueden ayudar a su reconstrucción (Dittmar et al. 2006; Príncipe et al. 2017).

Este tipo de perturbaciones han sido muy estudiadas en el Hemisferio Norte, principalmente en la costa este de los Estados Unidos (por ejemplo, Gu et al. 2008; Hufkens et al. 2012), y en Europa particularmente en *Fagus sylvatica* L. (Menzel et al. 2015; Dittmar et al. 2006; Príncipe et al. 2017). Sin embargo, hasta ahora, ningún proyecto ha evaluado la incidencia de la defoliación por heladas en bosques caducifolios templados en el Hemisferio Sur. En esta investigación, exploramos la incidencia de estos eventos en *Nothofagus pumilio* (Poepp. Et Endl.) Krasser, la especie arbórea dominante en el ambiente subalpino en los Andes patagónicos. La amplia distribución y el rango altitudinal hacen que *N. pumilio* sea potencialmente sensible a los daños por heladas tardías (Villalba et al. 1997). Sin embargo, no existe información previa sobre su incidencia, aunque en las zonas agrícolas de tierras bajas en el norte de la Patagonia el daño por heladas es una preocupación importante para los árboles frutales (Pascale et al. 1997; Tassara 2005; Cittadini et al. 2006).

El objetivo principal de este proyecto es cuantificar la incidencia de las heladas primaverales en los bosques de *N. pumilio* de los Andes patagónicos, y para desarrollar este objetivo principal, se plantean los siguientes objetivos específicos:

- **Objetivo 1.** explorar criterios climáticos y dendrocronológicos para identificar eventos de heladas primaverales;
- **Objetivo 2.** explorar nuevos *proxies* (microdensidad de la madera) para discernir heladas tardías de otras perturbaciones en periodos pre-instrumentales;
- **Objetivo 3.** desarrollar metodologías para determinar qué años y bosques han experimentado episodios de heladas tardías.

2.2. Descripción de la ejecución- Metodología

Área de estudio: Norte de la Patagonia.

Centramos el proyecto en el área de distribución norte de *N. pumilio* entre 35° y 42° S en la parte oriental (Argentina) y occidental (Chile) de los Andes en el Norte de la Patagonia. Aquí, los episodios de ataques de insectos (principalmente *Ormiscora* spp.) son menos frecuentes que en las poblaciones del sur (Paritsis et al. 2011). Además, cerca del "cerro El Tronador" (Argentina), se tomaron las muestras destinadas a los análisis de microdensidad de la madera. Los análisis previos indicaron una alta incidencia de las heladas primaverales en esta zona.

Cronologías previas de anchura del anillo

Este proyecto se ha realizado en colaboración con el grupo de trabajo de Ricardo Villalba del IANIGLA-CONICET en Mendoza (Argentina), y Duncan A. Christie de la Universidad Austral de Chile en Valdivia (Chile). Con el fin de explorar distintos criterios climáticos y

dendrocronológicos para identificar eventos de heladas, utilizamos una extensa red de cronologías que cubría la mayor parte de la distribución norte de *N. pumilio*. Esta colección incluye 30 localidades de *N. pumilio* y 11 localidades de *Austrocedrus chilensis* (D. Don) Pic. Serm et Bizarri (Fig. 1). *A. chilensis* es una conífera de hoja perenne coexistente con *N. pumilio* que no se ve afectada por las heladas primaverales en la copa. Se exploró las secuencias de crecimiento de esta especie como un posible criterio para identificar heladas en *N. pumilio*.

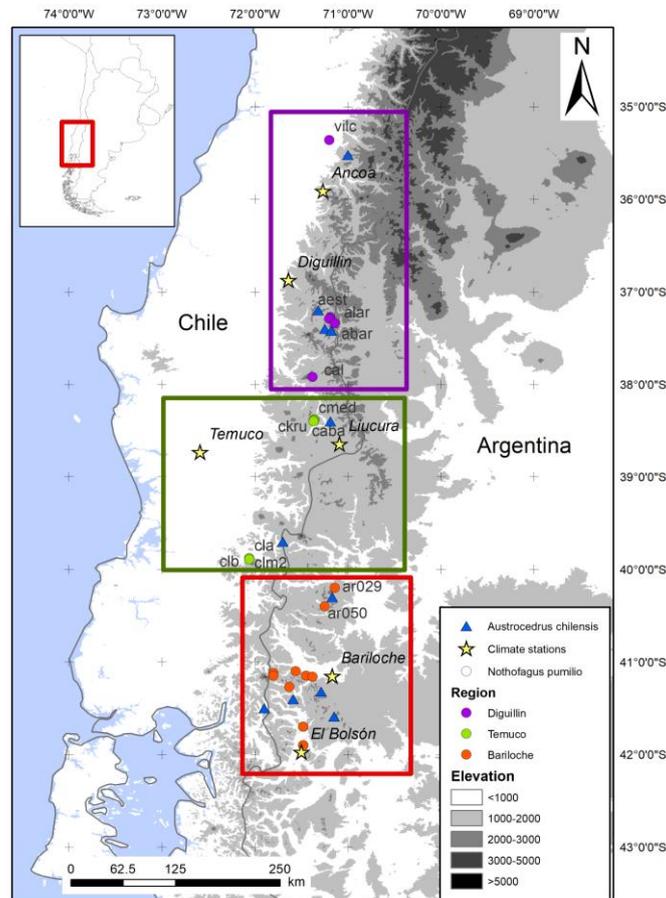


Fig.1. Localización de los sitios de *N. pumilio* y *A. chilensis* con cronologías de anchura del anillo en Argentina y Chile.

Trabajos de campo: obtención de testigos para microdensidad.

En marzo de 2019, el equipo de Ricardo Villalba del IANIGLA-CONICET seleccionó dos poblaciones de *N. pumilio* con un gradiente altitudinal de al menos 350 metros: PN (41.15°S, 71.80°W) y GCO (41.19°S, 71.79°W). Además, también se muestreó un bosque cercano de *A. chilensis*: CTR (41.25°S, 71.71°W). En cada uno de los dos sitios de *N. pumilio*, se establecieron 3 franjas altitudinales, se seleccionaron unos 10 árboles dominantes en cada franja, y se extrajeron varios testigos de crecimiento (Fritts, 2001; ver Tabla 1). Al menos se tomaron dos testigos para cuantificar el crecimiento anual, y un tercero para los análisis de microdensidad.

Tabla 1. Características de los sitios muestreados en marzo de 2019. Valores medios \pm error estándar.

Sitio	Especie	Rodal	Elevación (m s. n. m.)	N° de árboles /testigos	Diámetro a 1.3 m (d.a.p.)	Edad
GCO	<i>N. pumilio</i>	Alto	1613	11/39	11.8 \pm 0.6	66 \pm 7
	<i>N. pumilio</i>	Medio	1400	11/33	52.3 \pm 4.1	167 \pm 17
	<i>N. pumilio</i>	Bajo	1252	11/35	67.4 \pm 2.3	258 \pm 20
PN	<i>N. pumilio</i>	Alto	1420	11/41	22.2 \pm 1.0	69 \pm 5
	<i>N. pumilio</i>	Medio	1250	12/34	73.9 \pm 2.5	197 \pm 28
	<i>N. pumilio</i>	Bajo	1065	11/35	70.0 \pm 3.0	204 \pm 19
CTR	<i>A. chilensis</i>		920	20/46	63.1 \pm 3.9	190 \pm 12

Los testigos se secaron, se montaron sobre soportes de madera y se lijaron progresivamente hasta que los anillos fueron perfectamente visibles. Posteriormente, los testigos se dataron visualmente y se midieron utilizando un medidor de anillos semiautomático (Velmex Inc., EE. UU.) con una resolución de 0,01 mm. El proceso de datación se validó con el programa COFECHA (Holmes 1983). Para eliminar los efectos relacionados con la edad y el tamaño del árbol, ajustamos a los datos brutos de crecimiento una curva exponencial negativa y splines de 50 años de longitud.

Los testigos para densidad se pegaron en soportes de madera, y se cortaron con una sierra de precisión perpendicular a la dirección dominante de las fibras. Con las muestras de madera resultantes se procedió a su escaneo óptico y de rayos X. Para ello se utilizó un Itrax multiescanner y un tiempo de exposición de 125ms. Una vez escaneadas se midió el espesor de las muestras en varios puntos. Por último, utilizamos el paquete xRing en R (Campelo et al. 2019) para convertir los valores de grises del escaneo de rayos X en valores intranuales de densidad de la madera (g/cm^3).

Identificación de regiones y datos climáticos.

En primer lugar identificamos regiones homogéneas de *N. pumilio* considerando los patrones de crecimiento de los árboles y la sensibilidad climática. Se establecieron tres regiones: Diguillin (distribución norte de Chile), Temuco (distribución oeste de Chile) y Bariloche (distribución este de Argentina; Fig. 1). Seleccionamos dos estaciones meteorológicas por región, lo más cerca posible de los sitios con información dendrocronológica (Fig. 1).

Exploración de criterios para detectar heladas primaverales

En este proyecto exploramos diferentes criterios para identificar daños por heladas primaverales mediante datos climáticos y dendrocronológicos. De todos ellos, los que dieron mejores resultados fueron:

- i) las heladas primaverales inducen reducciones significativas del crecimiento local (a nivel de sitio) en comparación con la cronología media regional;
- ii) el daño por heladas es concurrente con anomalías en las temperaturas mínimas absolutas durante el período de desarrollo de las hojas;
- iii) la conífera perennifolia *A. chilensis* no muestra reducciones significativas de crecimiento en años con defoliaciones por heladas;
- iv) otras variables climáticas importantes que también podrían explicar las reducciones de crecimiento no muestran valores atípicos;
- v) no hay reconstrucciones de ataques de insectos en los sitios y años con daños potenciales;
- vi) los daños están asociados a reducciones de crecimiento severas a nivel de sitio;
- vii) en los años con daños potenciales hay una alta amplitud térmica durante la brotación.

A continuación se explica cada criterio brevemente. Para una información más detallada remitimos a los lectores a la publicación obtenida en este proyecto (ver apartado 2.3).

Criterio 1. Detección de reducciones del crecimiento local.

Identificamos reducciones del crecimiento local (a nivel de sitio) con respecto a la cronología de crecimiento regional, es decir, un bajo crecimiento radial en un año y sitio determinado con respecto al contexto de crecimiento en esa región y en ese año. Para ello, generamos una cronología de *N. pumilio* para cada región y calculamos la diferencia entre el índice de crecimiento anual de cada sitio y el índice regional.

Criterio 2. Temperaturas mínimas diarias durante el despliegue de la hoja.

Analizamos las temperaturas mínimas diarias en el período comprendido entre principios de octubre y la primera quincena de noviembre, cuando generalmente se produce la fenología foliar en *N. pumilio* (Martínez Pastur et al. 2007). Seleccionamos aquellos años con temperaturas mínimas absolutas inusualmente negativas durante este periodo.

Criterio 3. Comparación con la cronología regional de A. chilensis

En los años con reducciones del crecimiento local (criterio 1) se compararon con la cronología regional de *A. chilensis*. Si la cronología de *A. chilensis* mostró una reducción del crecimiento en ese año, atribuimos la reducción del crecimiento al estrés por sequía o a restricciones comunes no climáticas (por ejemplo, volcanes, terremotos o incendios forestales; Kitzberger et al. 1995). Si no observamos una reducción del crecimiento inusual en la cronología de *A. chilensis*, entonces asumimos que podría deberse a una helada primaveral.

Criterio 4. Sin desviaciones en otras variables climáticas importantes para el crecimiento

Analizamos si las anomalías en la precipitación y temperatura también podrían explicar las reducciones del crecimiento local. En primer lugar, relacionamos las cronologías de los anillos de los árboles con los datos climáticos mensuales utilizando coeficientes de correlación de Pearson (Fritts, 2001). En segundo lugar, en cada sitio, seleccionamos las variables climáticas que se correlacionaron significativamente con el crecimiento de los árboles ($P < 0.01$). Finalmente, para cada sitio y año, analizamos si existen desviaciones en las variables climáticas más importantes para el crecimiento.

Criterio 5. No hay daños documentados o reconstruidos de los agentes bióticos.

Los brotes de insectos son escasos en el área norte de distribución de *N. pumilio*, sin embargo, es posible la ocurrencia de ataques del género *Ormiscodes* (Paritsis et al. 2011). Dado que tanto el daño por heladas como los brotes de insectos causan anillos estrechos, descartamos los daños por heladas en años con ataques documentados o reconstruidos en los bosques estudiados (Paritsis et al. 2011).

Criterio 6. Identificación de anillos estrechos

Realizamos un análisis de identificación de anillos estrechos con la función *pointer.norm* del paquete *pointRes* (van der Maaten-Theunissen et al. 2015) en el entorno R (R Core Team 2017). Los eventos de heladas primaverales con daños parciales, que solo afectan a los árboles con fenología foliar temprana, podrían inducir una reducción significativa del crecimiento local, pero no tan generalizada para identificarse como un anillo estrecho a nivel de sitio.

Criterio 7. Variabilidad de las temperaturas antes y durante el despliegue de la hoja

La secuencia de temperaturas durante el desarrollo de la hoja es crítica para la ocurrencia de daños por heladas (Augspurger 2009, 2013). Las temperaturas anormalmente cálidas a principios de la primavera aceleran el desarrollo de las hojas y exponen a las fenofases más vulnerables a un mayor riesgo de heladas. Analizamos la amplitud térmica en este período como un *proxy* adicional del riesgo de daño por heladas.

Desarrollo de una metodología para identificar heladas en periodos instrumentales. Integración de criterios.

Integramos todos los criterios para identificar eventos de heladas según distintos niveles de incertidumbre (Fig. 2):

i) alta incertidumbre: se produjo una reducción del crecimiento local simultáneamente con bajas temperaturas mínimas durante el despliegue de la hoja. Sin embargo, la reducción del crecimiento no fue tan importante como para cumplir con los requisitos del análisis de identificación de anillos estrechos (criterio 6) y tampoco hay una alta amplitud térmica durante la brotación (criterio 7);

ii) incertidumbre media: se produjo una reducción del crecimiento local simultáneamente con temperaturas mínimas inusualmente bajas, y se cumple el criterio 6 o el 7;

iii) incertidumbre baja: se cumplieron todos los criterios;

iv) validación: se cumplieron todos los criterios y el daño por heladas se validó con registros de daños por heladas en cultivos agrícolas (1980 y 1992 en Bariloche; Tassara 2012).

Debido a la naturaleza de las heladas primaverales, también pueden coincidir con otras restricciones climáticas durante la misma estación de crecimiento (criterios 3 y 4). Por lo tanto, aunque se consideró el cumplimiento de estos dos criterios a la hora de identificar los eventos de daños por heladas según los distintos niveles de incertidumbre (Fig. 2), también indicamos cuándo otras restricciones climáticas pueden haber contribuido a la reducción del crecimiento.

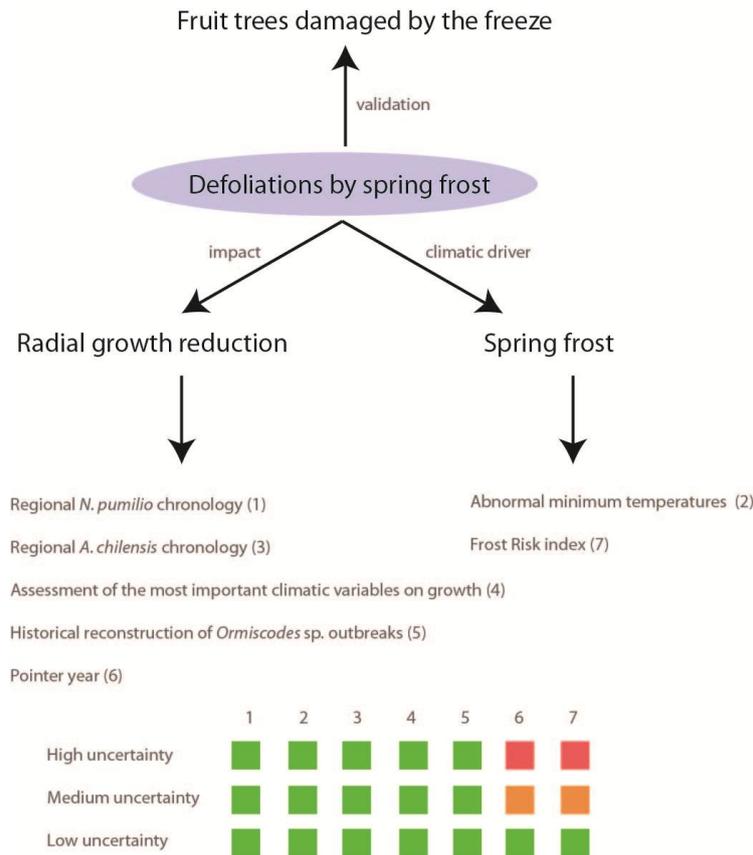


Fig. 2. Metodología desarrollada en este proyecto para identificar eventos de heladas primaverales con información climática y dendrocronológica.

2.3. Resultados obtenidos (cumplimiento de objetivos)

Objetivos 1 y 3. Identificación de años con daños por heladas en periodos instrumentales.

Ilustramos nuestra metodología con un ejemplo. Los sitios ar101 y ar103 (ambos en la región de Bariloche) mostraron reducciones del crecimiento local en 1958, 1980 y 1991 (Fig. 3). En 1958 y 1980, no se identificaron otras restricciones climáticas para el crecimiento, ni hubo tasas de crecimiento bajas en la cronología de *A. chilensis* (Fig. 3). Sin embargo, estos años mostraron temperaturas mínimas extremas durante el inicio de la fenología, y 1980 mostró una gran amplitud térmica durante la brotación y existen registros de daños por heladas en árboles frutales en este año.

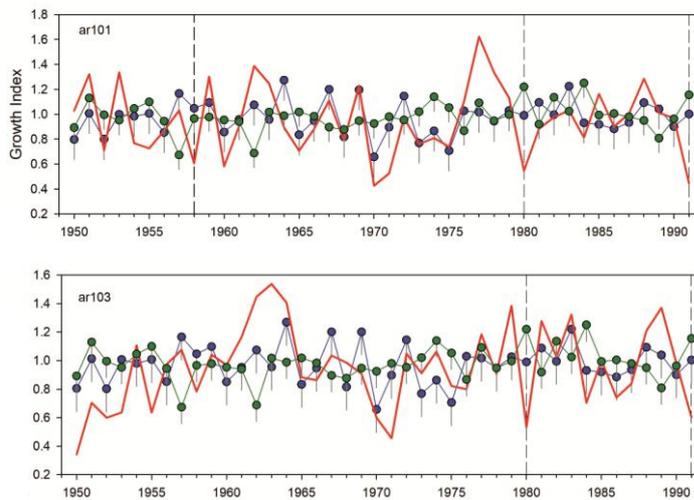


Fig. 3. Selección de posibles reducciones de crecimiento por heladas primaverales considerando la cronología local (líneas rojas), regional (líneas azules) y *A. chilensis* (líneas verdes).

Con la metodología desarrollada en este proyecto, pudimos reconstruir dos eventos de heladas primaverales (1980 y 1992) en cinco sitios de la región de Bariloche validados con datos de daños en frutales (Tabla 2). Además, registramos un evento con baja incertidumbre en 1957, pero con tasas reducidas de crecimiento en la cronología de *A. chilensis*, lo que probablemente indica un estrés adicional por sequía. También detectamos tres eventos con incertidumbre media en 1958, 1982 y 1991, aunque algunos bosques recibieron abundantes precipitaciones en diciembre que podrían haber influido negativamente en el crecimiento. Finalmente, se registraron dos eventos con alta incertidumbre en 1958 y 2010. En la región de Temuco, identificamos diferentes eventos de heladas potenciales con incertidumbres bajas y medias en 1952, 1955, 1965 y 1980, aunque con excepción de 1980 todos esos años también mostraron otras restricciones climáticas locales (Tabla 2). Finalmente, en la región de Diguillin, detectamos varios episodios en 1974, 1975, 1978, 1985 y 1995, aunque solo 1974 con incertidumbre baja y 1975 con incertidumbre media, no mostraron otras restricciones climáticas (Tabla 2).

En la región de Bariloche, varios eventos de daños por heladas mostraron temperaturas por debajo de -5 a -8 °C en la estación meteorológica de referencia durante el inicio de la fenología foliar. Por el contrario, las temperaturas en las regiones de Temuco y Diguillin fueron más altas, lo que indica posibles daños a solo -1 °C. Sin embargo, debido a las grandes distancias y las diferencias de elevación entre las estaciones meteorológicas y los bosques estudiados, las temperaturas mínimas en los sitios analizados podrían haber sido mucho más bajas.

Tabla 2. Eventos de heladas primaverales reconstruidos según diferentes niveles de incertidumbre. También se indica la temperatura mínima registrada durante la brotación, y si existe alguna desviación en alguna de las variables climáticas importantes para el crecimiento o tasas de crecimiento reducidas en la cronología de *A. chilensis* (AC).

Region	Año	Nº sitios/total	Temp mínima (°C)	Otros factores	Nivel de incertidumbre
Diguillín	1995	1/5	-2/0,2	AC	Alta
	1985	1/5	-1/0	PFeb	Alta
	1978	1/5	-3/1	AC	Media
	1975	1/5	-4/-1.5		Media
	1974	1/5	-1/-3		Baja
Temuco	1980	1/6	-1.2		Media
	1955	1/6	-1	PDic	Media
	1952	1/6	-1	TFeb	Media
	1965	2/6	-1.3	PNov	Baja
Bariloche	2010	1/19	-5		Alta
	1992	1/19	-8		Validado
	1991	4/19	-6	PDic	Media
	1982	2/19	-6		Media
	1980	4/19	-6		Validado
	1958	2/19	-6		Alta/Media
	1957	2/19	-9	AC	Baja/Media

Objetivo 2. Exploración de la microdensidad como proxy para identificar heladas en periodos pre-instrumentales.

Hemos obtenido las cronologías de anchura del anillo de todos los sitios muestreados en el marco de este proyecto (Fig. 1), y estamos en el proceso de obtención de los datos definitivos de microdensidad. Actualmente contamos con los datos relativos al sitio GCOM (sitio GCO rodal "medio"), aunque quedan más árboles por analizar (ver proceso de obtención de datos en Fig. 5).

Encontramos valores inusualmente bajos en 1941 y 2014 para la densidad mínima, así como en 1941, 1945, 1952-53, 1978 y 1989 para la densidad máxima. De todos estos años en 1941, 1953, 1978 y 2014 además existen reducciones en el crecimiento. De ellos, 1953 y 1978 también son años de bajo crecimiento en la cronología de *A. chilensis*, por lo que es esperable un estresor en común no relacionado con las heladas primaverales. En 2014, se registraron temperaturas bajas en la primera quincena de Octubre (-6°C), periodo en el que habitualmente comienza la fenología foliar en esta especie (Martínez Pastur et al. 2007). Lamentablemente no contamos con datos climáticos en 1941, aunque este año fue detectado como "anillo de helada" en *Araucaria araucana* (Hadad et al. 2019). Por otro lado, en contra de lo inicialmente planteado, no encontramos reducciones en el crecimiento en esta localidad en 1980, un año con contrastada incidencia de heladas primaverales en la región, en este caso será importante evaluar que ocurre en las otras altitudes.

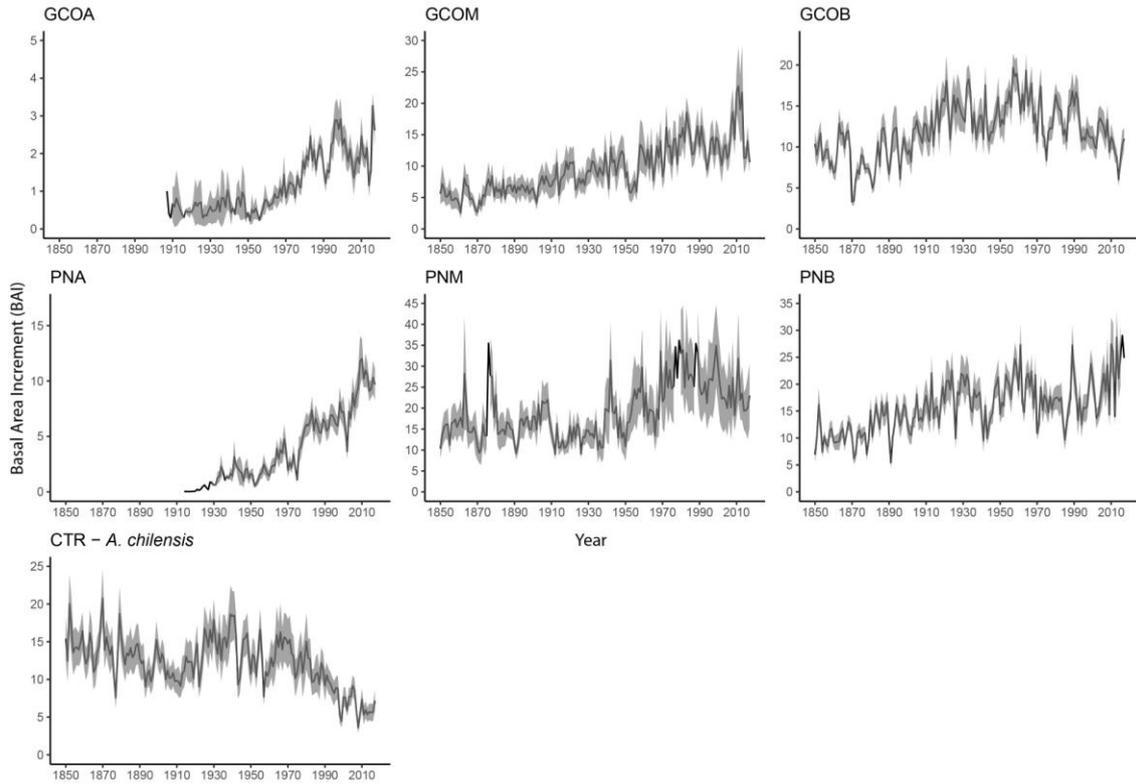


Fig. 4. Valores de incremento de área basal (BAI en inglés) de los 2 transectos altitudinales de *N. pumilio* muestreados (GCO y PN), y de la población de *A. chilensis* (CTR). GCOA, hace referencia a la zona alta del sitio GCO, GCOM zona media, GCOB zona baja. De forma similar para el sitio PN.

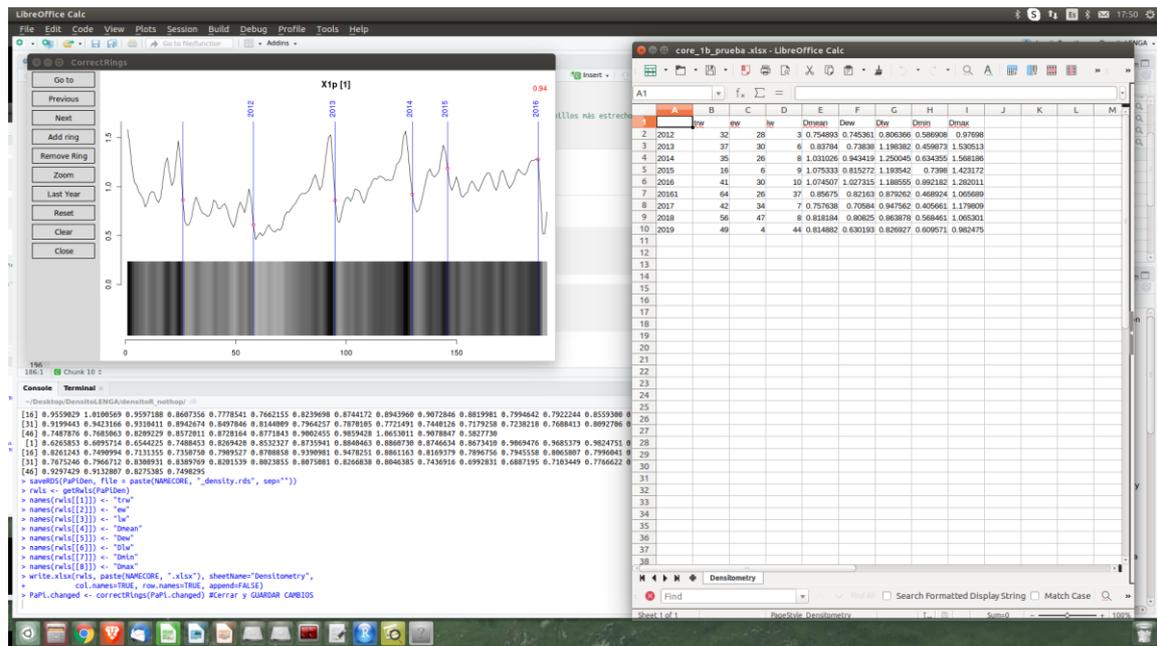


Fig. 5. Captura de pantalla del proceso de obtención de los datos de microdensidad.

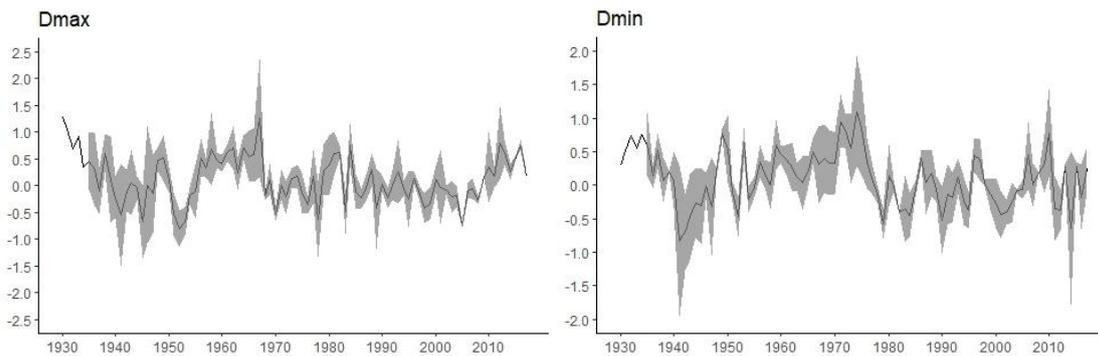


Fig. 6. Valores preliminares de densidad máxima y mínima en el sitio GCOM

Cumplimiento de objetivos

En este proyecto hemos explorado distintos criterios climáticos y dendrocronológicos que han servido para desarrollar una metodología para identificar daños por heladas tardías en periodos instrumentales (objetivos 1 y 3). Por lo tanto, hemos cumplido los objetivos inicialmente marcados. Además hemos conseguido publicar estos resultados en una revista de acceso abierto, por lo que también se ha conseguido la difusión de la investigación financiada.

En el objetivo 2, hemos explorado la microdensidad de la madera como proxy para identificar heladas tardías en periodos pre-instrumentales. Hemos podido abaratar enormemente los costes inicialmente presupuestados gracias a la colaboración de una técnico especialista en este tipo de análisis que nos ha permitido analizar el doble de muestras de las inicialmente propuestas. Sin embargo, hemos tenido problemas externos en el escaneo óptico y radiográfico de los testigos, que han ocasionado retrasos muy importante en la obtención de las imágenes. Actualmente, todavía estamos en proceso de obtención de los datos definitivos, por lo que los resultados mostrados en este documento todavía son muy preliminares.

Aunque el proyecto no ha sido totalmente completado a la espera de los datos definitivos de microdensidad, hemos conseguido cuantificar por primera vez la incidencia de las heladas tardías en los bosques de *N. pumilio* del Norte de la Patagonia, y por extensión en el Hemisferio Sur. Estos resultados han servido para realizar una publicación en una revista internacional Q1 (ver apartado publicaciones resultantes).

2.4. Conclusiones y valoración de la ejecución

En este proyecto hemos confirmado la diferente ocurrencia de heladas tardías en *N. pumilio* en su rango de distribución norte en los Andes Patagónicos. Los bosques argentinos con una mayor continentalidad debido a su mayor distancia al Pacífico presentan una mayor incidencia de daños por heladas primaverales. Aunque los datos de microdensidad todavía son muy preliminares, valores inusualmente bajos de esta variable, unido a reducciones de crecimiento importantes, podrían ser buenos indicadores de heladas primaverales en periodos preinstrumentales. Los Andes Patagónicos han experimentado un calentamiento significativo durante el siglo XX, y los modelos climáticos indican que estas tendencias continuarán (Carril et al. 1997; Vera et al. 2006). En este contexto climático, es probable que la fecha de inicio de la fenología de *N. pumilio* avance, lo que expondrá a los árboles a un riesgo cada vez más creciente de daños por heladas. Este trabajo contribuye al entendimiento de la relación entre las perturbaciones climáticas y la dinámica de las especies templadas caducifolias.

2.5. Publicaciones resultantes

Sangüesa-Barreda G, Villalba R, Rozas V, Christie DA, Olano JM (2019) Detecting *Nothofagus pumilio* growth reductions induced by past spring frosts at the northern Patagonian Andes. *Frontiers in Plant Science*, 10, 1–15.

2.6. Bibliografía

- Augsburger, C.K. (2009). Spring 2007 warmth and frost: Phenology, damage and refoliation in a temperate deciduous forest. *Funct. Ecol.* 23, 1031–1039.
- Augsburger, C. K. (2011). Frost damage and cascading negative effects on *Aesculus glabra*. *Plant Ecol.* 212, 1193–1203.
- Augsburger, C.K. (2013). Reconstructing patterns of temperature, phenology, and frost damage over 124 years: Spring damage risk is increasing. *Ecology* 94, 41–50.
- Bigler, C., and Bugmann, H. (2018). Climate-induced shifts in leaf unfolding and frost risk of European trees and shrubs. *Sci. Rep.* 8, 9865.
- Campelo, F., Mayer, K., Grabner, M., 2019. xRing—An R package to identify and measure tree-ring features using X-ray microdensity profiles. *Dendrochronologia* 53, 17–21.
- Carril, A.F., Menéndez, C.G., & Nuñez, M.N. (1997). Climate change scenarios over the South America region: An intercomparison of coupled general atmosphere-ocean circulation models. *Int. J. Climatol.* 17, 1613–1633.
- Charrier, G., Ngao, J., Saudreau, M., & Améglio, T. (2015). Effects of environmental factors and management practices on microclimate, winter physiology, and frost resistance in trees. *Front. Plant Sci.* 6, 1–18.
- Cittadini, E.D., de Ridder, N., Peri, P.L., & van Keulen, H. (2006). A method for assessing frost damage risk in sweet cherry orchards of South Patagonia. *Agric. For. Meteorol.* 141, 235–243.
- Dittmar, C., Fricke, W., and Elling, W. (2006). Impact of late frost events on radial growth of common beech (*Fagus sylvatica* L.) in Southern Germany. *Eur. J. For. Res.* 125, 249–259.
- Fritts, H.C. (2001). *Tree Rings and Climate*. Blackburn Press, Caldwell, NJ.
- Gu, L., Hanson, P. J., Post, W., Kaiser, D. P., Yang, B., et al. (2008). The 2007 Eastern US spring freeze: increased cold damage in a warming world? *Bioscience* 58, 253–262.
- Hadad, M.A., Arco Molina, J., Roig, F.A., Amoroso, M.M., Müller, G., Araneo, D., et al. (2019). Frost record in tree rings linked to atmosphere circulation in northern Patagonia. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*.
- Holmes, R.L. (1983). Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bull.* 44, 69–75
- Hufkens, K., Friedl, M.A., Keenan, T.F., Sonnentag, O., Bailey, A., O’Keefe, J., et al. (2012). Ecological impacts of a widespread frost event following early spring leaf-out. *Glob. Chang. Biol.* 18, 2365–2377.
- Inouye, D. W. (2000). The ecological and evolutionary significance of frost in the context of climate change. *Ecol. Lett.* 3, 457–463.
- IPCC (2013). Fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. In: Pachauri RK, Meyer LA (eds) Core Writing Team. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
- Jeong, S.J., Ho, C.H., Gim, H.J., & Brown, M.E. (2011). Phenology shifts at start vs. end of growing season in temperate vegetation over the Northern Hemisphere for the period 1982-2008. *Glob. Chang. Biol.* 17, 2385–2399.
- Kitberger, T., Veblen, T., & Villalba, R. (1995). Tectonic influences on tree growth in northern Patagonia, Argentina: the roles of substrate stability and climatic variation. *Can. J. Res.* 25, 1684–1696. doi:10.1139/x95-182
- Leinonen, I., and Hänninen, H. (2002). Adaptation of the timing of bud burst of Norway spruce to temperate and boreal climates. *Silva Fenn.* 36, 695–701.
- Martínez Pastur, G., Lencinas, M.V., Peri, P.L., & Arena, M. (2007). Photosynthetic plasticity of *Nothofagus pumilio* seedlings to light intensity and soil moisture. *For. Ecol. Manage.* 243, 274–282.
- Menzel, A., Helm, R., & Zang, C. (2015). Patterns of late spring frost leaf damage and recovery in a European beech (*Fagus sylvatica* L.) stand in south-eastern Germany based on repeated digital photographs. *Front. Plant Sci.* 6, 1–13.
- Menzel, A., Sparks, T. H., Estrella, N., Koch, E., Aasa, A., Ahas, R., et al. (2006). European phenological response to climate change matches the warming pattern. *Glob. Chang. Biol.* 12, 1969–1976.
- Paritsis, J., & Veblen, T.T. (2011). Dendroecological analysis of defoliator outbreaks on *Nothofagus pumilio* and their relation to climate variability in the Patagonian Andes. *Glob. Chang. Biol.* 17, 239–253.
- Pascale, A.J., Damario, E.A., & Bustos, C.A. (1997). Índice agroclimático de peligrosidad de heladas primaverales en frutales. *Revista de la Facultad de Agronomía (Universidad de Buenos Aires)* 17, 25–30.

- Príncipe, A., van der Maaten, E., van der Maaten-Theunissen, M., Struwe, T., Wilmking, M., and Kreyling, J. (2017). Low resistance but high resilience in growth of a major deciduous forest tree (*Fagus sylvatica* L.) in response to late spring frost in southern Germany. *Trees - Struct. Funct.* 31, 743–751.
- Tassara, M. A. (2007). Las heladas primaverales: protección en frutales de clima templado-frío. Ediciones INTA., 158.
- van der Maaten-Theunissen, M., van der Maaten, E., & Bouriaud, O. (2015). pointRes: an R package to analyze pointer years and components of resilience. *Dendrochronologia* 35, 34–38.
- Vera, C., Silvestri, G., Liebmann, B., & González, P. (2006). Climate change scenarios for seasonal precipitation in South America from IPCC-AR4 models. *Geophys. Res. Lett.* 33, 2–5.
- Villalba, R., Boninsegna, J.A., Veblen, T.T., Schmelter, A., & Rubulis, S. (1997). Recent trends in tree-ring records from high elevation sites in the Andes of Northern Patagonia. *Clim. Change* 36, 425–454.
- Vitasse, Y., Schneider, L., Rixen, C., Christen, D., & Rebetez, M. (2018). Increase in the risk of exposure of forest and fruit trees to spring frosts at higher elevations in Switzerland over the last four decades. *Agric. For. Meteorol.* 248, 60–69.

3. Informe de gastos del proyecto. Relación de partidas de gastos y sus importes. Se

deberán aportar justificantes originales de los pagos realizados (tickets, recibos o facturas).

Para abaratar los gastos de los análisis de microdensidad de la madera y analizar un mayor número de muestras, una técnico de nuestro grupo de trabajo se desplazó de Soria a Asturias en Septiembre de 2019 para realizar parte de los trabajos. De esta partida (350€) existen tickets para justificar 125,99€, quedando 224,01€ sin tickets.

De toda la cuantía del proyecto (2.500€), el 27,8% se destinó a los trabajos de campo, el 20,3% para material de campo y el 51,9% restante para los análisis de microdensidad.

Tabla 3. Gastos realizados durante el proyecto.

Descripción del gasto	ARS \$	EUR €
Gastos de campo. 6-15 Marzo 2019. Alojamiento.	15.101,36	343,21*
Gastos de campo. 6-15 Marzo 2019. Combustible.	5.301,5	120,47*
Gastos de campo. 6-15 Marzo 2019. Ferretería.	136,39	3,10*
Gastos de campo. 6-15 Marzo 2019. Comida.	10.008,35	227,46*
Escaneo óptico y radiográfico mediante microdensitometría de Rayos X		949,61
Material de campo. 2 barrenas Pressler 400mm y 3 iniciadores		509,71
Gastos desplazamiento técnico para análisis de microdensidad de la madera. Sept. 19. Combustible y comida.		350
Total		2.503,56

* Tasa de cambio en marzo de 2019 (1 EUR € = 44 ARS \$).



Fdo: Gabriel Sangüesa Barreda

en Soria, a 24 de Enero de 2020