


UNIVERSIDAD NACIONAL DE CUYO
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS



**ANÁLISIS DENDROECOLÓGICO DEL
CRECIMIENTO INTRAESPECÍFICO DE
SUBESPECIES DE PINUS NIGRA EN UNA
PARCELA BAJO RIEGO EN EL DIQUE
YAUCHA , PROVINCIA DE MENDOZA**

T E S I S D E G R A D O

María Emilia Abate

Director: Sergio Piraino
Codirector: Fidel Roig

MENDOZA, ARGENTINA
2023



UNCUYO
UNIVERSIDAD
NACIONAL DE CUYO



FACULTAD DE
**CIENCIAS
AGRARIAS**

**ANÁLISIS DENDROECOLÓGICO DEL CRECIMIENTO INTRAESPECÍFICO DE
SUBESPECIES DE *PINUS NIGRA* EN UNA PARCELA BAJO RIEGO EN EL
DIQUE YAUCHA , PROVINCIA DE MENDOZA**

Autora

María Emilia Abate

mabate@est.fca.uncu.edu.ar

Director

Sergio Piraino

spiraino@fca.uncu.edu.ar

Co-director

Fidel Alejandro Roig

froig@mendoza-conicet.gob.ar

Comisión evaluadora

1. Dr. Martín Ariel Hadad; mhadad@unsj-cuim.edu.ar
2. Dr. Juan Álvares; jalvarez@mendoza-conicet.gob.ar
3. Ing. Natalia Naves;

RESUMEN

A nivel mundial, las zonas áridas cubren más del 40% de la Tierra, hospedando más de dos mil millones de personas. A pesar de su gran déficit de precipitaciones en relación a la evapotranspiración potencial, estas áreas contribuyen significativamente a la diversidad de plantas y a la productividad global.

Los territorios de la República Argentina presentan una elevada variabilidad climática, topográfica y edáfica, cuya expresión se traduce en la presencia de ecosistemas forestales de marcada diversidad ecológica, incluyendo desde selvas subtropicales hasta bosques subantárticos. Entre las diferentes regiones que alberga, gran parte de la Provincia de Mendoza pertenece a la región fitogeográfica del Monte. La actividad forestal en esta región se limita aproximadamente a 15.000 hectáreas de cultivos bajo riego, principalmente de álamos, por el valor complementario que tiene su madera hacia la industria agropecuaria (tablas destinadas a cajonería, carpintería de obra, revestimientos, lápices, barrera contra vientos y heladas en los cultivos, entre otros).

Estudiar la viabilidad de los cultivos forestales de especies exóticas es de importancia estratégica como herramienta para analizar la potencialidad de nuevos forestales en pos de incrementar la rentabilidad económica y diversificar las oportunidades de producción maderera en los territorios de la Provincia de Mendoza. En este contexto, se investigó mediante métodos dendroclimatológicos la especie *Pinus nigra*, una conífera de clima templado con una amplia distribución desde África hasta Asia Menor, y que incluye diversas subespecies, reflejo de su elevada variabilidad genética y fenotípica. Los estudios dendroclimatológicos son esenciales para comprender cómo los factores climáticos (p. ej.: temperatura y precipitación) influyen en el crecimiento de los árboles y para brindar, entre otros, información cuantitativa en relación a la capacidad de aclimatación de una especie exótica a las características ambientales del área en la que sea establecida.

El objetivo de esta Tesina de grado fue examinar y comparar el comportamiento, expresado por las tasas de crecimiento radial y su relación con diferentes forzantes climáticos (precipitación total y temperatura media mensual), de diversas subespecies de pino negro instaladas en una parcela bajo riego en la Provincia de Mendoza, específicamente *P. nigra* ssp. *nigra*, *P. nigra* ssp. *dalmatica*, *P. nigra* ssp. *pallasiana* y *P. nigra* ssp. *salzmannii*. Este estudio permitió obtener información cuantitativa acerca de la relación entre fluctuaciones en la precipitación y la temperatura, y la variabilidad en el crecimiento radial anual para el sitio de estudio. Se reveló en primer lugar una influencia preponderante de las temperaturas sobre las tasas de incremento radial de las subespecies examinadas de *P. nigra*, aunque emergió un rol importante de la precipitación sobre las fluctuaciones del crecimiento del tronco. *P. nigra* ssp. *pallasiana* se identificó como la variedad con mayor potencialidad en aclimatarse al contexto árido de los territorios mendocinos.

PALABRAS CLAVE

Dendrocronología, *Pinus nigra*, riego, subespecies, variables climáticas.

ABSTRACT

Worldwide, arid zones cover more than 40% of the Earth, and are home to over two billion people. Despite their significant deficit in precipitation compared to potential evapotranspiration, these areas make an important contribution to plant diversity and global productivity.

The territories of the Republic of Argentina exhibit high climatic, topographic, and soil variability, resulting in the presence of ecologically diverse forest ecosystems, ranging from subtropical jungles to subantarctic forests. Among the different regions it encompasses, a significant portion of the province of Mendoza belongs to the phytogeographic region known as the "Monte." Forest activity in this region is limited to approximately 15000 hectares of irrigated crops, mainly consisting of poplar trees, due to the complementary value of their wood in the agricultural industry (making boards, construction carpentry, cladding, pencils, windbreaks, and frost protection for crops, among others).

The study of the feasibility of cultivating exotic species represents an alternative to increase economic profitability and diversifies forest production opportunities in these regions. In this context, the species *Pinus nigra*, a temperate climate conifer with a wide distribution from Africa to Asia Minor, encompassing various subspecies due to its genetic and phenotypic variability, was investigated through dendroclimatological methods. Dendroclimatological studies are essential for understanding how climatic factors (e.g., temperature and precipitation) influence tree growth, providing quantitative information regarding the adaptability of an exotic species to the environmental characteristics of the area in which it is established.

The objective of this Thesis was to examine and compare the behavior, expressed through radial growth rates and their relationship with different climatic factors (total precipitation and monthly mean temperature), of different subspecies of black pine planted in an irrigated plot in the province of Mendoza, specifically *P. nigra* ssp. *nigra*, *P. nigra* ssp. *dalmatica*, *P. nigra* ssp. *pallasiana*, and *P. nigra* ssp. *salzmannii*. This study provided quantitative information regarding the relationship between fluctuations in precipitation and temperature and the variability in annual radial growth for the study area. Firstly, a strong influence of temperature on the growth of *P. nigra* subspecies emerged, but there was also a significant role of precipitation. *P. nigra* ssp. *pallasiana* subspecies was found with better adaptability in the arid context of Mendoza.

KEYWORDS

Keywords: climatic variables, dendrochronology, irrigation, *Pinus nigra*, subspecies.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quiero agradecer a mi director Sergio Piraino, quien significó para mí un excelente guía, predispuesto y presente a ayudar en todo momento y brindándome todas las herramientas para no sentirme sola ni desentendida en este árduo trabajo final. También agradecerle a mi codirector Fidel Roig, por su reconocimiento en mi proyecto y la posibilidad de tener a disposición a una persona con tanta trayectoria en mi tema como lo es él. Finalmente, un agradecimiento especial a Alberto Calderón, por su entera predisposición al proveerme información y aclarar mis dudas ni bien lo necesitara.

A mi familia, por su amor incondicional, refugio y compañía a lo largo de toda mi carrera. Por confiar en mí, apoyarme, aconsejarme, alentarme y ser un abrazo sincero en los buenos y no tan buenos momentos. Por enseñarme a no tener miedo, a no conformarme y a atreverme a volar y soñar.

A todas mis amistades, que son oro para mí, aquellas que me dió el deporte, los viajes y las coincidencias de la vida. Las mismas que hoy se traducen en un jardín que crece y florece cada día más, lleno de respeto y cariño en este camino lleno de cambios, decisiones y pensamientos.

Gracias en particular, a mis amigos/as de la facultad, quienes han sido y son, un pilar fundamental para llegar a escribir finalmente hoy estas palabras. Hicieron de la facultad una trayectoria hermosa, donde no sólo fue un lugar para estudiar, si no también un espacio donde compartir, apoyar al otro/a, espacio sin competencia y aprendizaje de muchos valores, y hoy me siento agradecida de tener colegas y amigos/as.

A mi compañero y amor Manuel, por creer en mi persona, por apoyarme y alentarme todos los días a dar lo mejor para desarrollar esta tesis, a valorar este tiempo dedicado y engrandecer mi profesión y persona.

Estoy profundamente agradecida por la oportunidad de aprender y crecer en este entorno académico excepcional como lo es la Universidad Nacional de Cuyo.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
2. MATERIALES Y MÉTODOS	4
2.1. Área de estudio.	4
2.2. Descripción de las subespecies analizadas	6
2.2.1. <i>Pinus nigra</i> ssp. <i>salzmannii</i>	6
2.2.2. <i>Pinus nigra</i> ssp. <i>pallasiana</i>	7
2.2.3. <i>Pinus nigra</i> ssp. <i>nigra</i>	7
2.2.4. <i>Pinus nigra</i> ssp. <i>dalmatica</i>	7
2.3. Extracción de muestras de barreno, datación, medición y obtención de las cronologías de ancho de anillos	7
2.4. Comparación de los incrementos entre subespecies, y análisis de la relación crecimiento radial y factores climáticos	9
3. RESULTADOS	10
3.1. Características de las cronologías de ancho de anillos.....	10
3.2. Influencia de la variabilidad climática sobre el crecimiento radial anual	14
4. DISCUSIÓN	18
5. CONCLUSIONES	22
6. BIBLIOGRAFÍA	23

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: distribución natural de <i>Pinus nigra</i> . _____	3
Figura 2: a) Ubicación de la parcela de estudio y del Dique Yaucha. _____	5
Figura 3: Climograma representativo de la estación meteorológica del INTA San Carlos. _____	5
Figura 4: Muestra de barreno de incremento perteneciente a un individuo de <i>P. n. salzmannii</i> . _____	6
Figura 5: Muestra de barreno de incremento perteneciente a un individuo de <i>P. n. pallasiana</i> . _____	6
Figura 6: Muestra de barreno de incremento perteneciente a un individuo de <i>P. n. nigra</i> . _____	7
Figura 7: Muestra de barreno de incremento perteneciente a un individuo de <i>P. n. dalmatica</i> . _____	7
Figura 8: ejemplares de <i>P. nigra</i> ssp. en la parcela del Dique Yaucha. _____	7
Figura 9: Croquis de la parcela de estudio en San Carlos. _____	8
Figura 10: Cronologías de valores brutos de ancho de anillo anual (mm/año) de las subespecies de <i>P. nigra</i> . _____	12
Figura 11: Crecimiento diamétrico acumulativo para cada subespecie de <i>P. nigra</i> . _____	12
Figura 12: Crecimiento diamétrico acumulativo del promedio de individuos por subespecie. _____	13
Figura 13: Fluctuaciones en los valores de incremento radial anual bruto para el periodo en común 2000-2021. _____	13
Figura 14: Coeficientes de correlación entre la cronología residual de <i>P. n. dalmatica</i> y los valores de precipitación total mensual (izquierda) y de temperatura promedio mensual (derecha) de la estación meteorológica del INTA San Carlos. _____	14
Figura 15: Coeficientes de correlación entre la cronología residual de <i>P. n. nigra</i> y los valores de precipitación total mensual (izquierda) y de temperatura promedio mensual (derecha) de la estación meteorológica del INTA San Carlos. _____	15
Figura 16: Coeficientes de correlación entre la cronología residual de <i>P. n. pallasiana</i> y los valores de precipitación total mensual (izquierda) y de temperatura promedio mensual (derecha) de la estación meteorológica del INTA San Carlos. _____	15
Figura 17: Coeficientes de correlación entre la cronología residual de <i>P. n. salzmannii</i> y los valores de precipitación total mensual (izquierda) y de temperatura promedio mensual (derecha) de la estación meteorológica del INTA San Carlos. _____	16
Figura 18: Función de correlación entre el promedio de las temperaturas Noviembre-Diciembre y el incremento radial anual de cada subespecie. _____	17
Figura 19: índice de aridez de Martonne para el periodo 1995-2021. _____	18

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: características dendrocronológicas de las subespecies examinadas. _____	11
-----------------------------------------------------------------------------------------	----

1. INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, las zonas áridas representan el bioma más grande de la Tierra, cubriendo más del 40% de la superficie terrestre y albergando a más de dos mil millones de personas (Bastin et al., 2017; Wang et al., 2022). Estos ecosistemas se caracterizan por presentar una elevada diversidad ecológica, atestiguada por la presencia en tales áreas de alrededor del 20% de los puntos calientes (hotspots) de diversidad de plantas, y contribuyendo aproximadamente al 40% de la productividad primaria neta global (FAO, 1977; Maestre et al., 2021).

La actividad forestal en bosques nativos como modalidad de producción económica de la madera y sus derivados, es limitada en las zonas áridas debido a las reducidas tasas de crecimiento y productividad de los rodales naturales, consecuencia de condiciones de gran déficit de precipitaciones en relación a la evapotranspiración potencial (De Pauw et al., 2000). Según el IPCC (2022), se registra en las últimas décadas un incremento en los valores promedio de la temperatura, lo cual implica una prolongación del período de vegetación y mejora la producción primaria de los bosques (Lindner et al., 2010). Sin embargo, la contemporánea tendencia a menores precipitaciones limita el crecimiento de los árboles debido a la escasez del recurso hídrico meteórico (Allen et al., 2015; Isaac-Renton et al., 2018). Esto sugiere la importancia de la selección de posibles cultivos maderables basada en el conocimiento del material forestal, representando este un paso crucial en pos de la mitigación de los efectos negativos del proceso actual de cambio climático de un manejo sustentable de los bosques (Thurm et al., 2018). En este sentido entonces, adquiere una elevada importancia el estudio sobre la potencialidad de diferentes cultivos forestales de especies exóticas, como alternativa para incrementar la rentabilidad económica y diversificar las oportunidades de producción en las regiones desérticas (García et al., 2023).

Los territorios de la República Argentina presentan un amplio espectro de condiciones climáticas, topográficas, y edáficas, cuya expresión se traduce en la presencia de ecosistemas forestales de marcada diversidad ecológica, incluyendo desde selvas subtropicales hasta bosques subantárticos (Matteucci et al., 2021; UMSEF, 2014). La Provincia Biogeográfica del Monte representa una región árida de elevada diversidad geológica, geomorfológica y altimétrica, en cuyas zonas con disponibilidad suplementaria de agua (p.ej. ambientes riparios; napa freática poco profunda) se encuentran los bosques de *Neltuma ssp.*, vulgarmente conocidos como algarrobales (Abraham et al., 2009; Villagra et al., 2009). Desde el punto de vista climatológico, el Monte representa un ambiente semiárido/árido con valores anuales de precipitación que oscilan entre 30 y 450 mm, una gran amplitud térmica anual regional, y la presencia de un marcado déficit hídrico a lo largo de todo el año (Morello, 1958; Abraham et al., 2009).

En lo que corresponde a los territorios de la Provincia de Mendoza, los mismos se encuentran distribuidos, con la excepción de una mínima presencia de áreas pertenecientes a las Provincias Altoandina y Puneña, en casi su totalidad a la previamente mencionada Provincia Biogeográfica del Monte (Abraham et al. 2009). En estos distritos, los bosques naturales han sufrido una explotación de carácter minero, que no consideró criterios de sustentabilidad en función de las extremadamente bajas tasas de incremento de los rodales de algarrobo (Piraino et al., 2017; Villagra et al., 2020). En la actualidad, estos bosques son aprovechados localmente por miembros de la comunidad local de origen Huarpe, lo cual indica que el mercado provincial relativo al recurso maderable no puede sustentarse sobre los productos ofrecidos por tales ecosistemas (Villagra et al., 2020). En las últimas décadas, de hecho, los bosques artificiales han cumplido el rol antiguamente ejercido por los algarrobales ya duramente explotados (Frangi et al., 2015). En este contexto, las características climáticas de nuestra Provincia, han implicado históricamente la necesidad de establecer sistemas de riego complementarios a los aportes hídricos representados por las precipitaciones, en pos de poder desarrollar los diferentes cultivos forestales (Martin, 2008).

La actividad forestal dentro de la Provincia de Mendoza corresponde a aproximadamente 15.000 ha con cultivos bajo riego, representados casi exclusivamente por especies pertenecientes al género *Populus* (álamo). Dicha actividad presenta un carácter de tipo complementario, al cumplir un rol de apoyo a la principal matriz agropecuaria (Calderón et al., 2008). En este sentido, la misma provee madera a las industrias locales de aserrado para la posterior producción de tablas destinadas a cajonería, además de carpintería de obra, revestimientos, lápices y otros usos como en la conformación de cortinas rompevientos (Calderón et al., 2000; Calderón et al., 2004).

No obstante, la importancia estratégica previamente mencionada en lo que concierne a las diferentes forestaciones con especies del género *Populus*, la incertidumbre relacionada con las variaciones de precios del mercado de la madera, unida a la escasez del recurso hídrico experimentada en la última década en los territorios de la Provincia de Mendoza, sugieren la necesidad y la conveniencia de incrementar la diversidad de especies en las plantaciones forestales locales (Priya y Bhat, 1999). En este contexto de búsqueda de variedad en el panorama forestal provincial, la familia *Pinaceae* incluye un conjunto de especies madereras de alto valor económico y con potencialidad para las áreas de la Provincia de Mendoza, debido a sus características adaptadas a las condiciones climáticas propias de las zonas áridas (Versace et al., 2022). Dentro de esta familia, *Pinus nigra*, vulgarmente conocido como pino negro, pino salgareño, pino laricio o pino negral, representa una conífera de climas templados a mediterráneos, cuyas poblaciones se distribuyen a lo largo de 3,5 millones de hectáreas desde las montañas del noroeste de África hasta Asia Menor, e incluyendo el sur de Europa, en una franja altitudinal que va desde los 300 hasta los 2200 msnm (Thompson, 2005). Esta amplia, aunque discontinua distribución, es expresión de su gran variabilidad genética y fenotípica, motivo por el cual es considerada como una especie colectiva, es decir, que abarca diversas subespecies (Quézel y Médail, 2003). De hecho, pueden mencionarse hasta seis subespecies localizadas en los territorios que van desde el noroeste de África hasta la península de Crimea: *P. nigra* ssp. *nigra*, *P. nigra* ssp. *mauretanica*, *P. nigra* ssp. *dalmatica*, *P. nigra* ssp. *laricio*, *P. nigra* ssp. *pallasiana* y *P. nigra* ssp. *salzmannii* (Versace et al., 2022).

El pino negral se destaca como especie de considerable importancia económica gracias a la alta calidad de su madera, con características de homogeneidad, rigidez y resistencia, lo que la hace especialmente apta para el trabajo mecánico en una variedad de aplicaciones (Climent et al., 2013; Fernández-Golfín et al., 2001). Las diferentes subespecies de pino negral, por otro lado, representan forestales ampliamente utilizados en las plantaciones localizadas en distritos externos a su área de distribución natural, debido a las elevadas tasas de crecimiento durante las etapas tempranas de la vida del árbol (Ferriol et al., 2022). A su vez, tales subespecies presentan características físico-mecánicas de la madera que les otorgan un amplio abanico de usos potenciales en diferentes actividades relacionadas a la matriz productiva forestal. Por ejemplo, *P. nigra* ssp. *pallasiana* es especialmente valorada en la construcción y fabricación de tejados debido a la rectitud de su tronco (Isajev et al., 2009). Por otro lado, la madera de *P. nigra* ssp. *nigra*, aunque de calidad inferior a *P. nigra* ssp. *pallasiana*, es aprovechada para embalajes, combustible y obtención de postes, además de ser empleada de manera difusa en programas de forestación para controlar deslizamientos de tierra, rehabilitar terrenos y fijar dunas (Isajev et al., 2009).

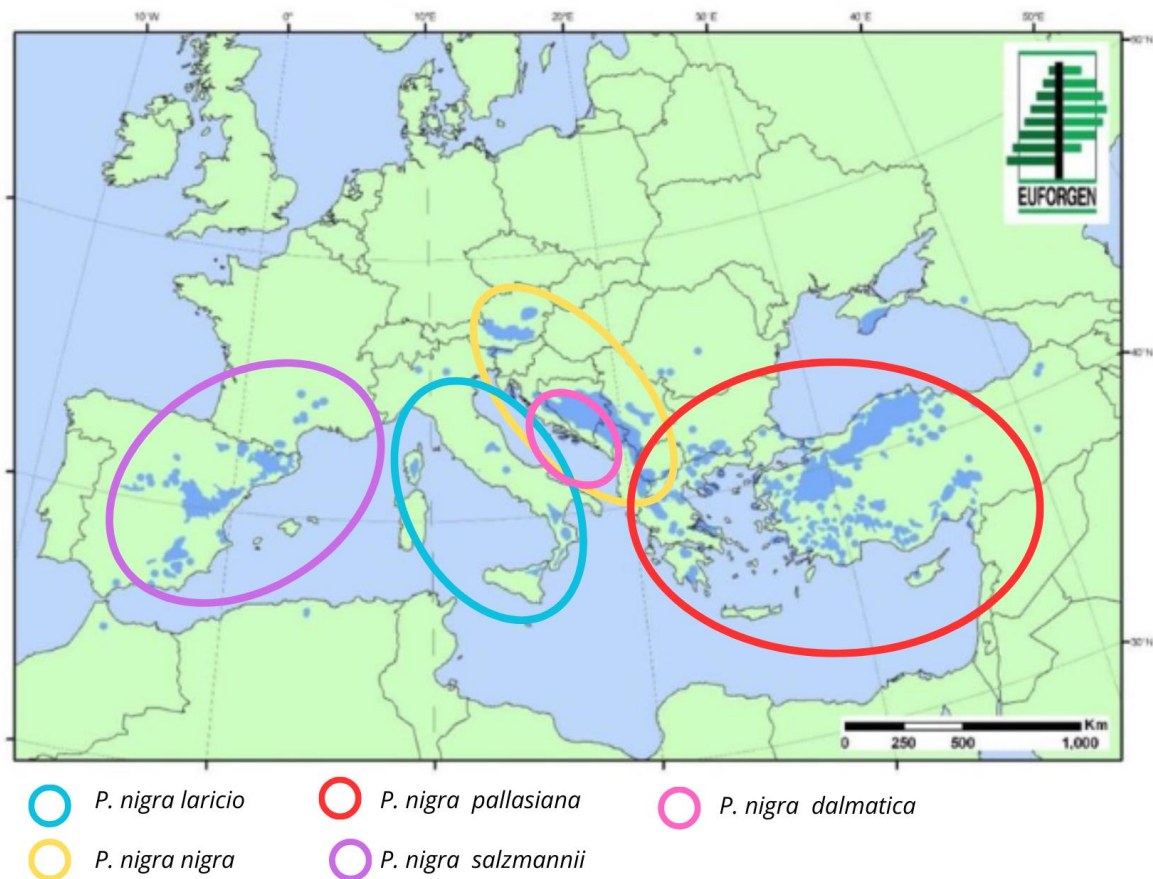


Figura 1: distribución natural de las distintas subespecies de *Pinus nigra* (Euforgen, 2003).

Investigaciones previas han evidenciado una notable supervivencia y comportamiento de *P. nigra* en los territorios localizados en la Provincia de Mendoza, exhibiendo el pino negral los valores más elevados de productividad en comparación con otras especies pertenecientes al mismo género (*P. griffithii*, *P. halepensis*, *P. pinaster*, *P. pinea* y *P. radiata*), sugiriendo por ende su mayor potencialidad como especie maderable respecto a otros pinos de climas fríos y mediterráneos (Calderón et al., 2004). Estos estudios han brindado conocimientos importantes en relación a las tasas de crecimiento de *P. nigra* en las áreas del secano mendocino. No obstante, hasta la fecha aún no se ha considerado la dinámica en el crecimiento radial a escala anual, ni la capacidad de aclimatación de las diferentes subespecies a las condiciones climáticas locales de sectores de la Provincia de Mendoza. Tales informaciones son de interés para la posible incorporación a la matriz productiva de la industria maderera provincial de este forestal, considerando además que las adaptaciones de algunas subespecies de pino negral a características climáticas de tipo semiárido en su distribución natural sugieren su potencialidad como alternativa en el aprovechamiento maderero de plantaciones de especies exóticas en nuestros territorios.

La determinación del crecimiento anual de una especie leñosa puede lograrse examinando el arreglo anatómico de la madera que se traduce en la presencia de anillos de crecimiento anual (Speer, 2009). La identificación de tales estructuras corresponde al campo de la disciplina conocida como dendrocronología (del griego *dendron*, árbol, *khronos*, tiempo, y *logia*, estudio de), la cual presenta diferentes aplicaciones según el objetivo de estudio (Speer, 2009). En este sentido, dichos métodos aportan información respecto de la datación de restos de madera de construcciones antiguas (dendroarqueología), proveen datos cuantitativos relativos a la influencia de diferentes forzantes ambientales sobre los incrementos radiales anuales (dendroclimatología), y también brindan conocimiento por lo que concierne a los

efectos de diferentes factores de disturbios, tanto naturales cuanto antrópicos, sobre la dinámica forestal (dendroecología), entre otros (Fritts, 1976; Speer, 2009). Los estudios dendroclimatológicos, en particular, permiten inferir la causa proximal que subyace a la formación del ancho del anillo relacionada a la influencia de los factores climáticos (p. ej.: temperatura y precipitación), y brindan, entre otros, información en relación a la capacidad de aclimatación de una especie exótica a las características ambientales del área en la que sea establecida (Speer, 2009).

Conocer la potencialidad de crecimiento de la especie bajo la crisis climática actual, permite contribuir a incrementar la posibilidad de desarrollo económico de productores forestales frente al riesgo de inversión actual causada por la incertidumbre derivada de los procesos de cambio climático, aspecto que se ha vuelto relevante y que justifica la disposición de investigaciones en el manejo sostenible de los ecosistemas forestales (Versace et al., 2022). La importancia de *P. nigra* en el mercado forestal internacional (Fernández-Golfín et al., 2001) sugiere la utilidad de construir modelos relativos a la dinámica en el crecimiento radial de dicha especie, además de las vinculaciones de este con las variables climáticas, en pos de verificar su potencialidad para las áreas localizadas en la Provincia de Mendoza.

Por lo previamente expuesto, el objetivo de esta Tesina es examinar y comparar el comportamiento, expresado por las tasas de crecimiento radial y su relación con diferentes forzantes climáticos (precipitación total y temperatura media mensual), de diversas subespecies de pino negral instaladas en una parcela bajo riego en la Provincia de Mendoza, mediante el empleo de un enfoque dendroecológico y dendroclimatológico. Específicamente, se examinaron diferentes individuos arbóreos pertenecientes a las subespecies *P. nigra* ssp. *nigra*, *P. nigra* ssp. *dalmatica*, *P. nigra* ssp. *pallasiana* y *P. nigra* ssp. *salzmannii*, reconstruyendo las tasas de crecimiento radial a escala anual, analizando de manera exploratoria la vinculación de las mismas con las variables climáticas locales, y examinando las posibles diferencias en ambos aspectos según las subespecies estudiadas, en pos de explorar el potencial de esta especie en la matriz forestal provincial en los territorios mendocinos.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio.

El sitio de estudio se encuentra ubicado en el departamento de San Carlos, dentro del piedemonte mendocino, a 34° latitud sur y 69° longitud oeste, a una altitud de 1.213 msnm (Calderón et al., 2004).

Climatológicamente, el sitio de estudio presenta características propias de la Provincia Biogeográfica del Monte, con valores de temperatura promedio de 7,5 y 22 °C en invierno y verano, respectivamente, y leves variaciones a lo largo del año en el régimen de precipitaciones, siendo más abundantes estas últimas en el transcurso de las estaciones de otoño y verano (Fig. 3). Los vientos son moderados y la precipitación nívea invernal oscila entre 400 y 500 mm (Calderón et al. 2004). El suelo se caracteriza por ser pedregoso a arenoso, presentando elevada permeabilidad (Calderón et al., 2004).

Los individuos examinados de *P. nigra* se encuentran en una parcela sometida a riego por surco, proviniendo el recurso hídrico suplementario del Arroyo Yaucha (Calderón et al., 2008; Fig. 4). En relación al aporte de agua mediante irrigación, la ausencia de una supervisión adecuada no permitió cuantificar con precisión la cantidad de recurso suministrada a los pinos instalados en la plantación examinada, impidiendo por ende relacionar cuantitativamente el crecimiento radial de los diferentes individuos con los valores de lámina de riego aplicadas. En lo que corresponde a las condiciones climáticas, se asumió que las mismas fueran homogéneas a lo largo de la parcela de estudio, debido a su pequeña extensión (aproximadamente 650 m²).

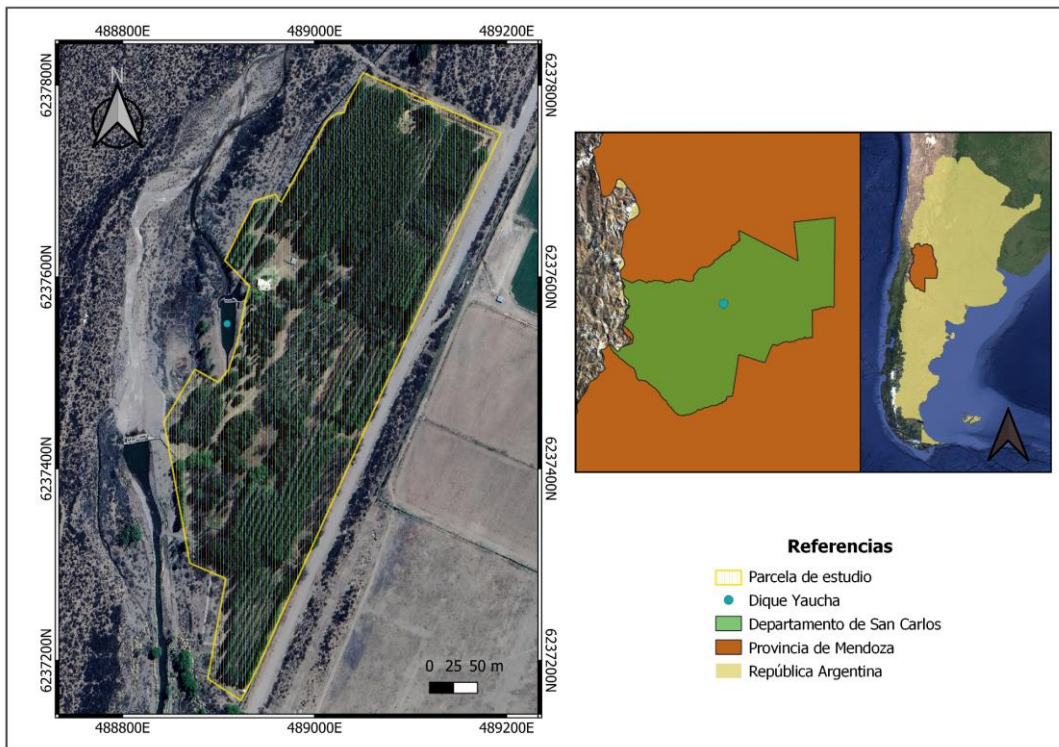


Figura 2: Ubicación de la plantación forestal localizada en las cercanías del Arroyo Yaucha representada por el círculo de color azul (figura izquierda); localización del sitio de estudio en el Departamento de San Carlos y la Provincia de Mendoza en la República Argentina, respectivamente (figura derecha).

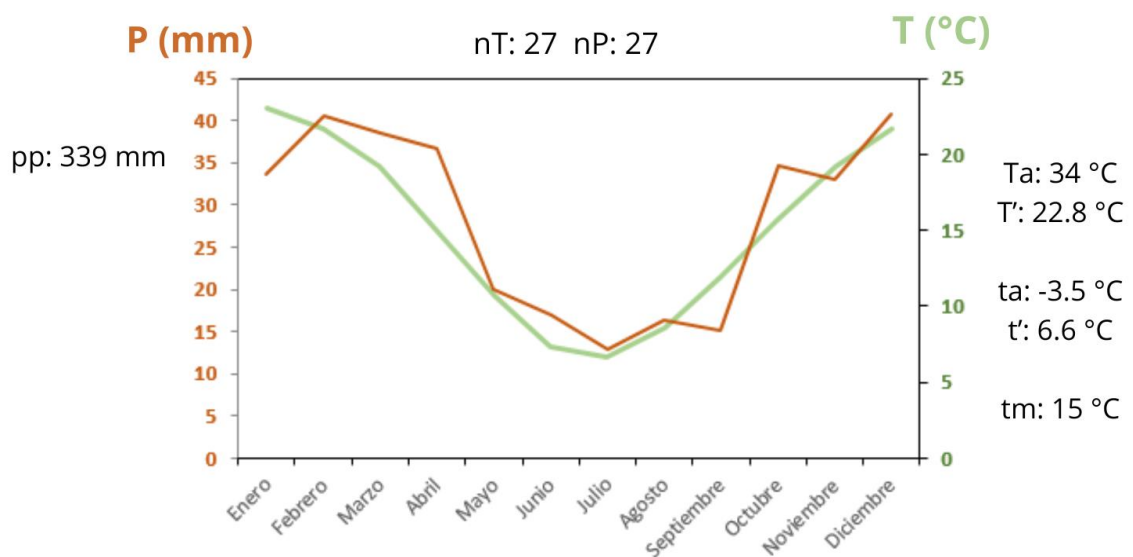


Figura 3: Climograma representativo de la estación meteorológica del INTA San Carlos (33.73 S; 69.1 O). Se muestran los valores de precipitación media mensual (línea naranja) y temperatura media mensual (línea verde). nT = número de años registrados de las temperaturas; nP = número de años registrados de las precipitaciones; pp = media de las precipitaciones anuales; Ta = temperatura máxima absoluta; T' = media de las temperaturas máximas anuales; t' = media de las temperaturas mínimas absolutas anuales; ta = temperatura mínima absoluta; tm = temperatura media.

Por lo que concierne al material analizado, la plantación de *P. nigra* presenta una distancia entre individuos de 3 x 3 m, habiendo sido establecidos un total de 87 plantines en el año 1990

pertenecientes a diferentes subespecies (Calderón et al., 2004). Del total de individuos plantados, en la actualidad se encuentran 74 árboles con excelentes condiciones sanitarias, habiéndose registrado un 15% de pérdida por fallas. Las procedencias plantadas fueron: *P. nigra* ssp. sub. *salzmannii*, *P. nigra* ssp. *nigra*, *P. nigra nigra* ssp. *dalmatica*, y *P. nigra nigra* ssp. *pallasiana*. Las mismas representan casi la totalidad de las subespecies presentes en el área de distribución natural de *P. nigra* (Versace et al., 2022).



Figura 4: ejemplares de *P. nigra* ssp. en la parcela del Dique Yaucha.

2.2. Descripción de las subespecies analizadas

2.2.1. *Pinus nigra* ssp. *salzmannii*

Vulgarmente se lo conoce como pino de Salzman, pino salgareño o pino negro. Representa un pino de media y alta montaña, creciendo entre 500 y 2200 m de altitud y localizado desde los Pirineos franceses hasta los territorios de Andalucía (Ferriol et al., 2022).



Figura 5: Muestra de barreno de incremento escaneada a 1200x perteneciente a un individuo de *P. n. salzmannii*.

Se encuentra distribuido en un área caracterizada por valores de precipitación anual entre 700 y 1500 mm, y se caracteriza por presentar una baja capacidad de tolerar los fríos invernales, pero una elevada tolerancia a los episodios de sequía estival (Ferriol et al., 2022).

2.2.2. *Pinus nigra ssp. pallasiana*

Conocido vulgarmente como pino negro, se distribuye en Bulgaria, Grecia oriental y Turquía, en áreas de características climáticas de semiáridas hasta subhúmedas, con valores de precipitaciones anuales comprendidos entre 400 y 800 mm, y a altitudes entre 300 a 1800 msnm (Isajev et al., 2009). En su área de distribución natural, representa una especie característica de hábitats costeros y montañosos, no logrando instalarse exitosamente en las elevaciones más bajas de la costa sur mediterránea, ya que no tolera la presencia de veranos largos y calurosos (Köse et al., 2012).



Figura 6: Muestra de barreno de incremento escaneada a 1200x perteneciente a un individuo de *P. n. pallasiana*.

2.2.3. *Pinus nigra ssp. nigra*

Vulgarmente conocido como pino austriaco o pino negro, se distribuye naturalmente desde los Apeninos italianos al norte de Grecia, a través de los Alpes Julianos y los Balcanes. Desde el punto de vista ecológico, muestra una clara preferencia por climas templados, como es atestiguado por los valores de precipitación anual que oscilan entre 700 y 1500 mm. Se distribuye en altitudes que van desde 350 hasta 1.000 metros snm (Isajev et al., 2009; Climent et al., 2013).



Figura 7: Muestra de barreno de incremento escaneada a 1200x perteneciente a un individuo de *P. n. nigra*.

2.2.4. *Pinus nigra ssp. dalmatica*



Figura 8: Muestra de barreno de incremento escaneada a 1200x perteneciente a un individuo de *P. n. dalmatica*.

Conocido vulgarmente como pino negro, se distribuye naturalmente en los territorios de las islas costeras de Croacia, en las laderas meridionales de los Alpes Dináricos y en los Pirineos franceses entre 500 y 900 metros de altitud, en áreas caracterizadas por valores de precipitación anual que oscilan entre 700 y 1500 mm (Isajev et al., 2009).

2.3. Extracción de muestras de barreno, datación, medición y obtención de las cronologías de ancho de anillos

En septiembre de 2021, se seleccionaron dentro del área de estudio un total de 25 individuos representativos de las cuatro subespecies previamente descritas (Fig. 9). La elección de los individuos fue establecida siguiendo criterios relativos al estado sanitario, con el objetivo de analizar árboles que no presentaran signos de decaimiento de copa o evidencia de procesos

de mortandad. Por otro lado, no fueron muestreados los árboles localizados en los bordes de las hileras, así como los individuos ubicados en las hileras contiguas a otras parcelas de ensayo caracterizadas por la presencia de árboles pertenecientes a *P. halepensis* y *P. pinea*. Esto permitió minimizar, respectivamente, la posible influencia sobre los incremento radial del efecto borde y de los fenómenos de competencia inter-específica. En el caso de la subespecie *P. nigra* ssp. *nigra*, se seleccionaron 10 individuos debido a que esta subespecie se encuentra representada por dos procedencias distintas, Livo y Lasa, que fueron analizadas en conjunto ya que las características climáticas son muy similares (Calderón et al., 2008). Por lo que concierne a las restantes subespecies, se procedió a examinar 5 individuos por procedencia, representando este valor el total de los árboles establecidos en el ensayo original (Calderón et al., 2008).

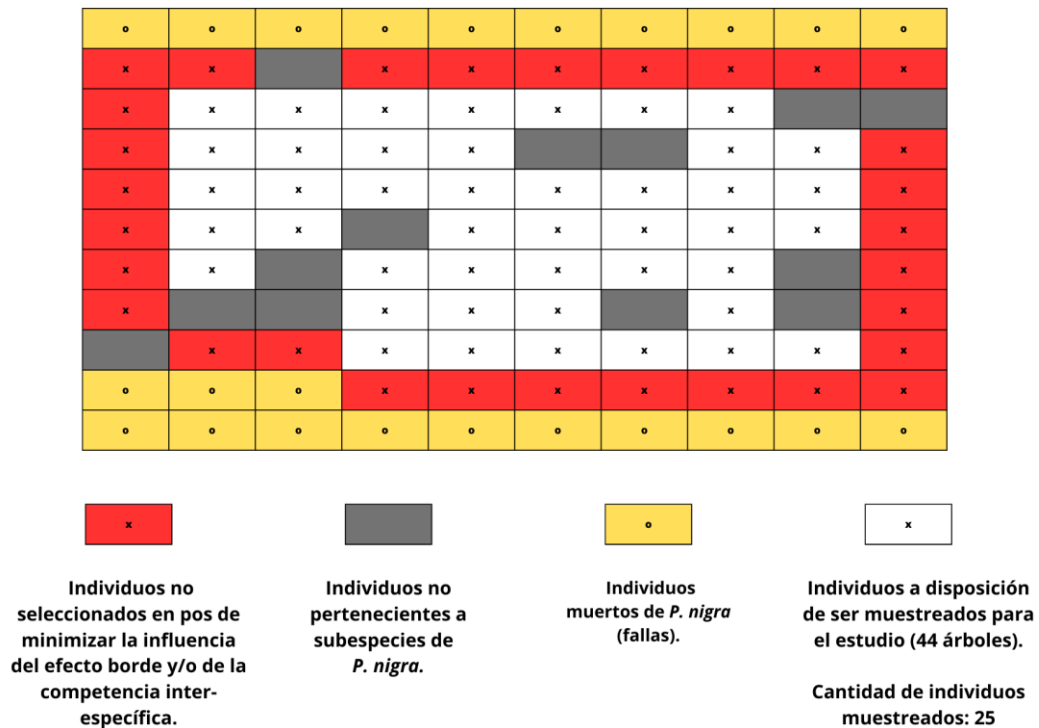


Figura 9: Croquis de la parcela de *P. nigra* ssp. en el sitio de estudio Dique Yaucha

El muestreo dendrocronológico fue llevado a cabo extrayendo a altura de pecho (aproximadamente 1,30 m sobre el nivel del suelo) dos muestras por cada individuo examinado en dirección perpendicular al tronco, mediante un barrenador de Pressler de 5 mm de diámetro, evitando irregularidades en el fuste (p. ej. presencia de cicatriz de ramas podadas). Las muestras de barrenador fueron almacenadas procediendo a identificar el lugar de extracción, la subespecie correspondiente, la fecha de extracción del material leñoso, además del número correspondiente del árbol muestreado. Los tarugos fueron posteriormente fijados con pegamento vinílico en soportes de madera, para proceder luego al pulido del material leñoso mediante lijas de granulometría de densidad creciente de 60 hasta 400. Gracias a este procedimiento, fue posible obtener superficies lisas y sin imperfecciones que permitieran una correcta visualización del arreglo anatómico que determina la presencia de los anillos de crecimiento (Stokes y Smiley, 1968). Luego, estos últimos fueron fechados desde la corteza hacia la médula, asignando a cada anillo el año calendario correspondiente al año de comienzo de formación del leño siguiendo la convención para el Hemisferio Sur (Schulman,

1956). A continuación se realizó la digitalización con una resolución de 1200x de las muestras mediante un scanner HP Deskjet 3050, y las imágenes JPG obtenidas fueron utilizadas para medir los incrementos anuales mediante el programa CooRecorder (Maxwell y Larsson, 2021).

Las mediciones anuales en el crecimiento radial de las diferentes muestras analizadas fueron validadas estadísticamente mediante el programa COFECHA (Holmes, 1983). Una vez corroborada la calidad de las mismas, se analizaron los siguientes índices estadísticos: intercorrelación entre series (IC), expresión de la relación entre los valores de crecimiento radial de los árboles muestreados; coeficiente de autocorrelación de primer orden (AC1), índice de la influencia del crecimiento radial del año previo sobre el año de crecimiento corriente; sensibilidad media (SM), traducción estadística de la diferencia relativa que existe entre el ancho de un anillo con el desarrollado en el año siguiente (Speer, 2009).

2.4. Comparación de los incrementos entre subespecies, y análisis de la relación crecimiento radial y factores climáticos

Se procedió a analizar los valores anuales de ancho del anillo bruto por el periodo en común 2000-2021 (n=22), con el objetivo de identificar posibles variaciones en los valores de crecimiento radial según las subespecies examinadas. En este cálculo fueron excluidos los primeros 4 años de vida de los individuos examinados, debido a las grandes fluctuaciones entre crecimientos máximos y mínimos, posiblemente causado por el establecimiento de plantines procedentes de vivero (ver Fig. 10 en la sección Resultados de esta Tesina). Para ello, las tasas de incremento radial fueron primero sometidas a los test estadísticos de Shapiro-Wilk y Levene en pos de comprobar los supuestos de normalidad y homocedasticidad, respectivamente, con un nivel de significancia de $p < 0,05$. Debido a que dichos supuestos no se cumplieron (datos no mostrados), se procedió a efectuar una prueba de Kruskal Wallis para varianza no paramétrica, determinando la presencia o ausencia de diferencia significativa por $p < 0,05$. El análisis estadístico fue llevado a cabo mediante el programa INFOSAT/P (2008). Por otro lado, se estimaron los incrementos individuales en diámetro multiplicando por dos los valores de las mediciones de los anillos de cada individuo. Con este dato, se calculó el incremento diamétrico acumulado (CDI) para los individuos pertenecientes a cada subespecie como la suma de los incrementos anuales actuales en el diámetro para cada año biológico. La comparación de los valores promedio de CDI permitió contrastar los valores de productividad entre las subespecies examinadas.

Posteriormente a la construcción de las cronologías de anchos de anillos brutos, se procedió a remover la señal dendrocronológica de baja frecuencia, relacionada a factores tales como la edad del árbol y/o a posibles eventos de disturbio (p. ej.: mortandad de individuos), con el objetivo de poder comparar las fluctuaciones en los valores de incremento anual con las variables climáticas. Esto se llevó a cabo mediante un proceso de estandarización de las fluctuaciones anuales en los incrementos radiales, aplicando a cada serie individual de ancho de anillo una función polinomial de tercer grado (*spline*: Cook, 1987; Speer, 2009). Esta estandarización se llevó a cabo a través del programa ARSTAN40c, software que produce tres diferentes versiones de cronología estandarizada (standard, residual, y arstan, respectivamente; Cook y Krusic, 2006). En esta Tesina, fue seleccionada la versión residual de las cronologías estandarizadas, ya que la misma minimiza la autocorrelación existente en los incrementos radiales anuales, permitiendo de tal manera evitar una sobreestimación de la influencia real de los forzantes ambientales sobre la dinámica en el crecimiento del árbol (Villalba y Veblen, 1997). Las cronologías de datos estandarizados a nivel individual fueron promediadas separadamente por cada subespecie, de manera tal de obtener cronologías representativas de las mismas y que pudieran ser empleadas posteriormente en el cálculo de las relaciones entre crecimiento radial y factores climáticos.

Con el objetivo de cuantificar la relación entre variaciones en los valores estandarizados de ancho de anillo anual y forzantes climáticos, las series dendrocronológicas estandarizadas relativas a cada subespecie fueron contrastadas con los valores mensuales de precipitación

total y temperatura promedio de la estación meteorológica INTA La Consulta, perteneciente al repositorio SIGA (Sistema de Información y Gestión Agrometeorológica; datos disponibles en la página web <http://siga.inta.gob.ar/#/>; Fig.3). Con tal objetivo, se procedió a efectuar el cálculo de funciones de correlación simple mediante el programa DENDROCLIM2002 (Biondi y Waikul, 2004). Este software aplica el método bootstrap, minimizando de tal manera la influencia de la co-linealidad existente en las series climáticas y permitiendo obtener resultados estadísticos que representen fehacientemente la incidencia de los factores ambientales sobre las fluctuaciones en el crecimiento radial (Biondi y Waikul, 2004). Las funciones de correlación fueron calculadas para el periodo común 2000-2021, examinando por separado las series según las distintas subespecies, en pos de identificar posibles respuestas diferenciales como función del origen del material examinado. Se consideró la ventana temporal que va desde abril del año previo al crecimiento radial hasta marzo del año corriente. Por último, se analizaron separadamente, a partir de los resultados de los análisis previamente mencionados, la relación entre incremento radial estandarizado y variaciones climáticas de las variables y meses que presentaron los valores más elevados de índice de correlación (ver sección Resultados).

Como fue mencionado en la sección 2.1, los individuos examinados en esta investigación han sido sometidos a riego por surco. La ausencia de datos cuantitativos no permitió considerar el aporte de agua suplementaria en el cálculo de las funciones de correlación, a diferencia de los datos climáticos disponibles para el área examinada. Por ello, con el objetivo de inferir indirectamente la posible incidencia del riego sobre el crecimiento del pino negral en el territorio examinado, se procedió al cálculo de los años característicos (Schweingruber et al., 1990). Según su definición, un año característico está representado por valores de crecimiento radial que difieren de manera significativa de las tasas de incremento promedio de un periodo anterior y posterior de extensión variable (Schweingruber et al., 1990). Se reconocen un año característico positivo, indicio de condiciones ambientales particularmente favorables para el desarrollo radial, o un año característico negativo, expresión de situaciones adversas en el ambiente para la actividad cambial individual (Schweingruber et al., 1990). En este trabajo se procedió a examinar exclusivamente los años característicos negativos. Mediante este cálculo se pretendió verificar si la disminución abrupta en el crecimiento fuera de origen climática o, en caso contrario, posiblemente adjudicable a la presencia de una escasa lámina de riego. A tal fin, primero fueron definidos como años característicos negativos aquellos años en los que el 100% de los individuos utilizados en la construcción de las cronologías mostraran una disminución en el crecimiento radial de por lo menos el 50%. Se estableció el primer umbral considerando la relativamente baja representación numérica del material dendrocronológico (entre 5 y 10 individuos por subespecie). Luego, se aplicó el método de la normalización en una ventana móvil las series de ancho de anillo estandarizado, empleando un intervalo temporal de 7 años (Cropper, 1979; Jetschke et al., 2019), mediante las facilidades del programa WEISER (Gonzalez, 2001). Posteriormente, la presencia temporal de los años característicos negativos fue comparada con el índice de aridez de Martonne (IA; de Martonne, 1926), calculado como $IA = P/(T+10)$, donde P representa la precipitación total mensual y T la temperatura promedio mensual. El IA fue computado a partir de los datos climáticos utilizados en el cálculo de las funciones de correlación (de Martonne, 1926). Finalmente, las variaciones anuales de una serie de IA construida a partir de los resultados de las funciones de correlación (ver sección Resultados de esta Tesina), fue examinada para identificar posibles coincidencias entre los años característicos negativos y posibles eventos de estrés hídrico consecuencia de condiciones climáticas adversas.

3. RESULTADOS

3.1. Características de las cronologías de ancho de anillos

En la Tabla 1 se presentan las características dendrocronológicas de las diferentes subespecies examinadas en esta Tesina. Cuatro cronologías de ancho de anillos fueron

construidas a partir de un total de 43 muestras de barreno de incrementos, representativas de 24 individuos de pino negral (96% de los árboles muestreados). Las cronologías de ancho de anillos oscilan entre 24 (1998-2021; *P. nigra* ssp. *salzmannii*) y 28 años de extensión (1994-2021; *P. nigra* ssp. *nigra*).

Los valores de inter-correlación entre series (IC) fluctúan entre 0,52 (*P. nigra* ssp. *salzmannii*) y 0,56 (*P. nigra* ssp. *dalmatica*), siendo la totalidad de los valores estadísticamente significativos al nivel de $p < 0,05$ (Tabla 1). El incremento medio anual en el ancho del anillo (IMA) oscila entre 2,71 (*P. nigra* ssp. *salzmannii*) y 3,35 mm/año (*P. nigra* ssp. *pallasiana*; Tabla 1). El valor de autocorrelación de primer orden (AC1) es superior a 0,65 para todas las subespecies, alcanzando un máximo de 0,71 para la subespecie *P. nigra* ssp. *pallasiana* (Tabla 1). Finalmente, los valores de sensibilidad media (SM) fluctúan entre 0,37 (*P. nigra* ssp. *salzmannii*) y 0,45 (*P. nigra* ssp. *dalmatica*; Tabla 1).

Tabla 1: características dendrocronológicas de las subespecies examinadas. N: número de individuos que contribuyen a la cronología (entre paréntesis, número de muestras); Periodo: extensión temporal promedio de cada cronología; IC: correlación entre series; IMA: incremento medio radial; AC1: coeficiente de autocorrelación; SM: sensibilidad media.

Subespecie	N	Periodo	IC	IMA (mm)	AC	SM
<i>P. nigra</i> ssp. <i>salzmannii</i>	5(10)	1998-2021	0.52	2.71	0.65	0.37
<i>P. nigra</i> ssp. <i>nigra</i>	9(17)	1994-2021	0.55	3.04	0.65	0.37
<i>P. nigra</i> ssp. <i>dalmatica</i>	5(8)	1996-2021	0.56	3.14	0.66	0.45
<i>P. nigra</i> ssp. <i>pallasiana</i>	5(8)	1996-2021	0.53	3.36	0.71	0.39

Las cronologías de valores brutos de ancho de anillo anual reflejan cambios abruptos en las 4 subespecies durante los primeros 6 años biológicos de crecimiento (periodo 1994-2000; Fig. 10). A partir del año 2000 se observa un crecimiento con tendencia exponencial negativa en el crecimiento radial de todas las subespecies (Fig. 10).

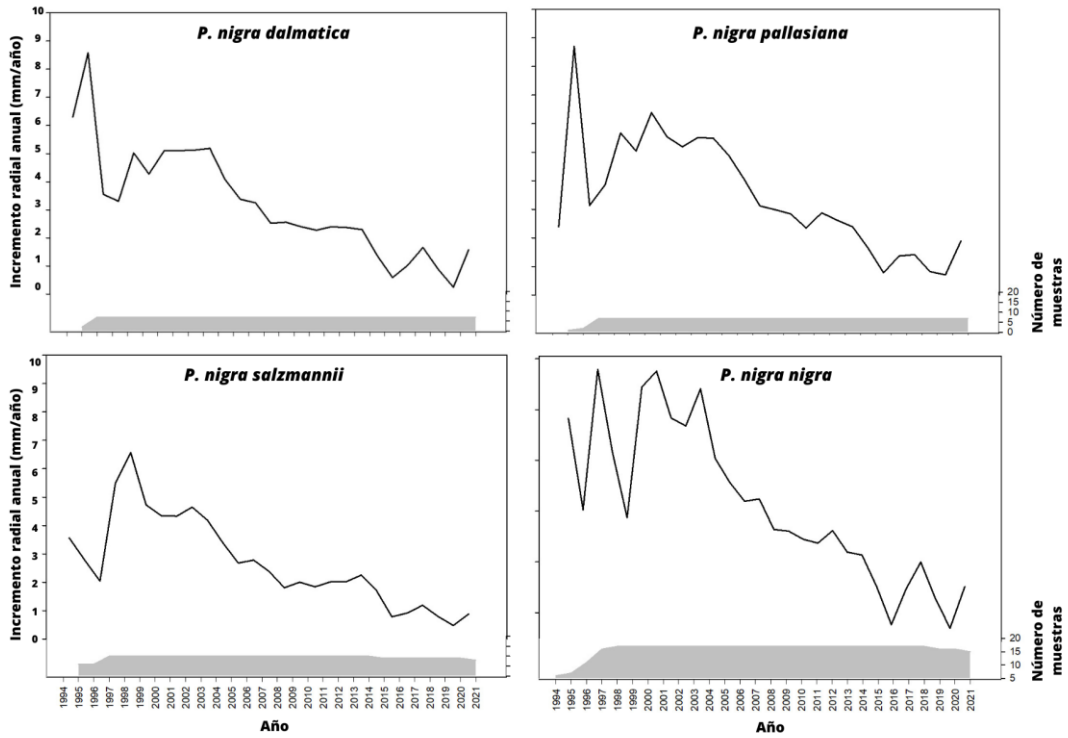


Figura 10: Cronologías de valores brutos de ancho de anillo anual (mm/año) de las diferentes subespecies de *P. nigra* examinadas. En gris se presenta el número de series utilizadas para realizar cada cronología (referencias lado derecho).

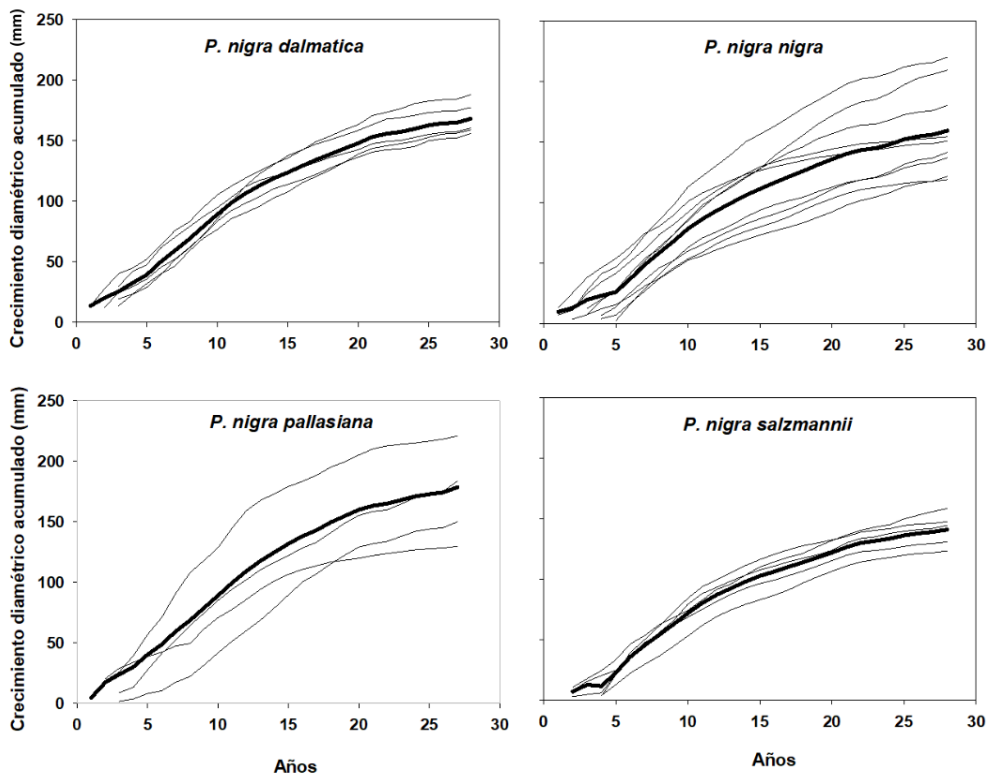


Figura 11: Crecimiento diamétrico acumulativo para cada subespecie de *P. nigra*. La línea más gruesa de cada gráfico corresponde al promedio del crecimiento diamétrico acumulado de los individuos.

El análisis del crecimiento diamétrico acumulativo reveló que los individuos de las subespecies alcanzaron a los 28 años de edad, un diámetro mínimo de 14,1 cm (*P. nigra* ssp. *salzmannii*) y máximos de 16,6 - 16,8 cm (ssp. *pallasiana* y ssp. *dalmatica*, respectivamente) (Fig. 11 y 12).

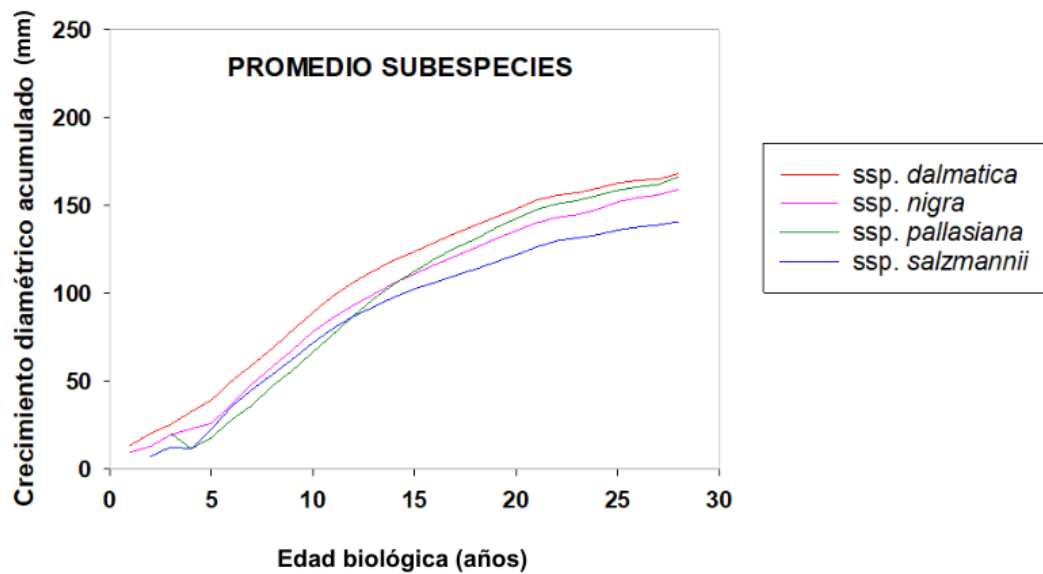


Figura 12: Crecimiento diamétrico acumulativo del promedio de individuos por subespecie.

Finalmente, no emergieron diferencias estadísticamente significativas de los valores anuales de crecimiento bruto entre las subespecies examinadas (ANOVA no-paramétrico de Kruskal Wallis; $p = 0,4470$; Fig. 13).

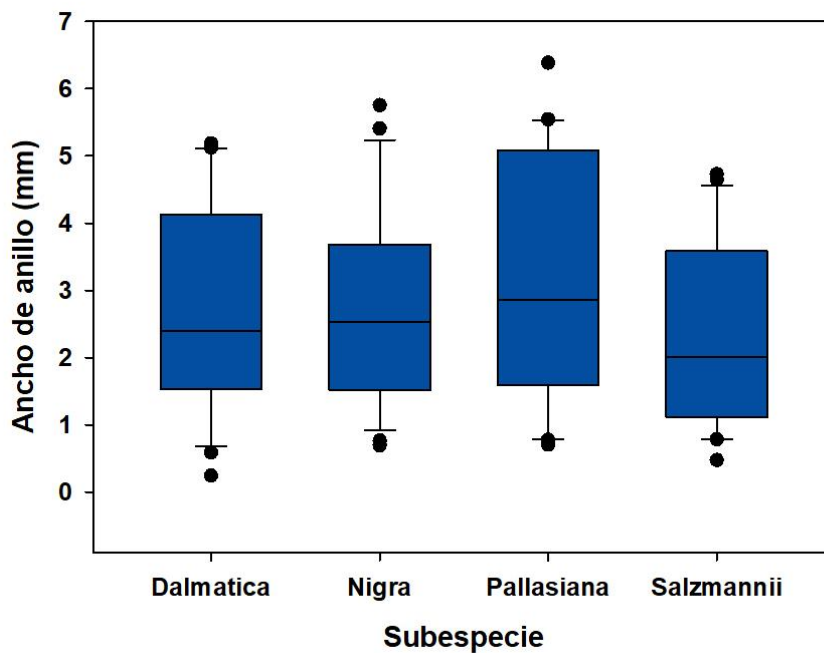


Figura 13: Gráficos de caja-bigote para los valores de incremento radial anual bruto para el periodo en común 2000-2021. Cada caja muestra los valores comprendidos en la distancia de un intercuartil (25% por encima y por debajo del promedio). El promedio se muestra como línea negra. Los bigotes corresponden a un valor de 1.5 veces la distancia de un intercuartil, y se muestran como líneas negras. Los círculos negros representan los valores atípicos.

3.2. Influencia de la variabilidad climática sobre el crecimiento radial anual

En las Figuras 14-17 se muestran los resultados de las funciones de correlación entre las cronologías de datos estandarizados para cada subespecie examinada, y las variables climáticas referidas a los valores de precipitación total mensual y temperatura media mensual.

En lo relativo a la cronología de *P. nigra* ssp. *dalmatica*, puede notarse la presencia de una relación negativa con las precipitaciones del mes de junio del año previo al crecimiento radial ($r = -0.33$; $p < 0,05$; Fig. 14). Por otro lado, no emergieron relaciones significativas entre el crecimiento de esta subespecie y los valores de temperatura mensual (Fig. 14).

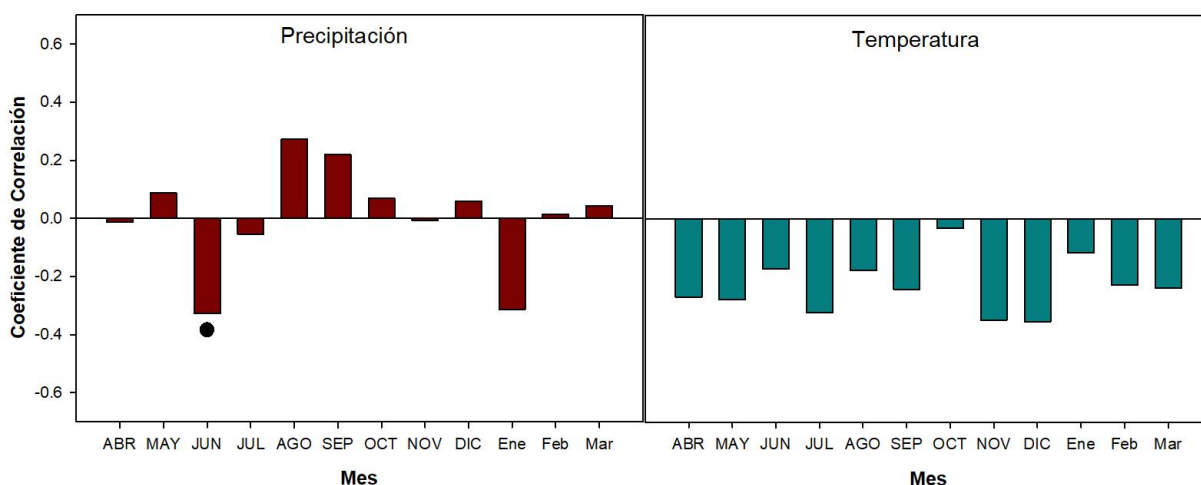


Figura 14: Coeficientes de correlación entre la cronología residual de *P. nigra* ssp. *dalmatica* y los valores de precipitación total mensual (izquierda) y de temperatura promedio mensual (derecha) de la estación meteorológica de INTA San Carlos. Los círculos representan valores significativos al nivel $p < 0,05$.

Por lo que concierne a *P. nigra* ssp. *nigra*, se observó la ausencia de correlaciones estadísticamente significativas entre el crecimiento radial y los valores de precipitación total mensual (Fig. 15). Por otro lado, el crecimiento de esta subespecie está influenciado negativa y significativamente por la temperatura invernal del periodo junio-julio del año previo ($r = -0,38$ y $r = -0,56$, respectivamente; $p < 0,05$), y por los valores de temperatura de los meses de final de primavera (noviembre) y principio de verano (diciembre) del año corriente ($r = -0,41$ y $r = -0,62$, respectivamente; $p < 0,05$).

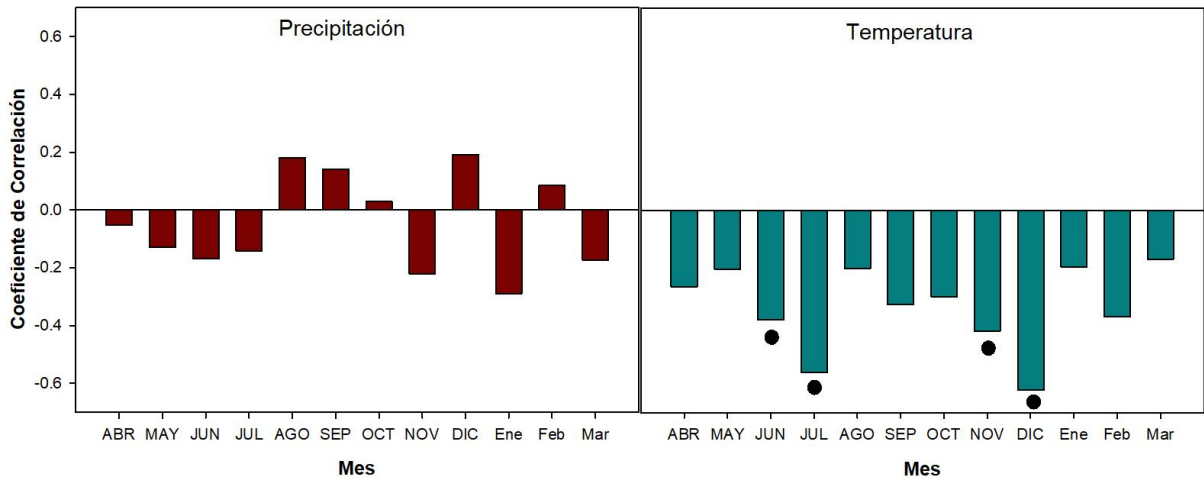


Figura. 15: Coeficientes de correlación entre la cronología residual de *P. nigra ssp. nigra* y los valores de precipitación total mensual (izquierda) y de temperatura promedio mensual (derecha) de la estación meteorológica de INTA San Carlos. Los círculos representan valores significativos al nivel $p < 0,05$.

Para la cronología de *P. nigra ssp. pallasiana* (Fig. 16), emergió una relación positiva y estadísticamente significativa entre las fluctuaciones anuales en el crecimiento radial y los valores de precipitación del mes de septiembre del año previo al crecimiento ($r = 0,44$; $p < 0,05$). En lo que concierne a la influencia de la temperatura, se registró una relación negativa entre el crecimiento radial y los valores de tal variable en los meses de otoño y comienzo de invierno (abril, mayo y junio) del año anterior al crecimiento ($r = -0,39$, $r = -0,35$ y $r = -0,37$, respectivamente; $p < 0,05$). La variabilidad del crecimiento radial también se relacionó de forma negativa y estadísticamente significativa con los valores de las temperaturas de primavera y principios de verano, correspondientes a los meses de septiembre, noviembre y diciembre ($r = -0,47$, $r = -0,52$ y $r = -0,54$, respectivamente; $p < 0,05$).

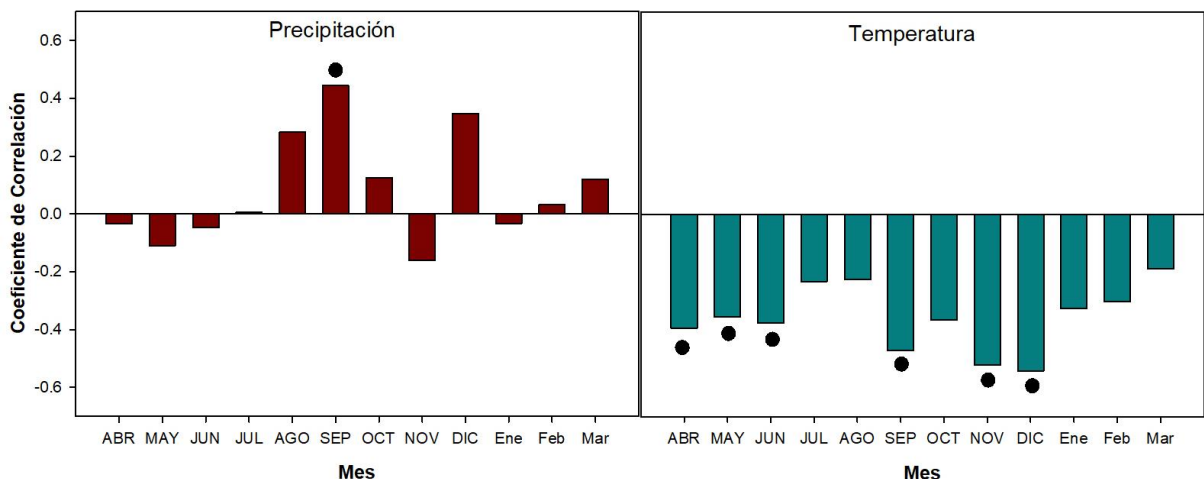


Figura 16: Coeficientes de correlación entre la cronología residual de *P. nigra ssp. pallasiana* y los valores de precipitación total mensual (izquierda) y de temperatura promedio mensual (derecha) de la estación meteorológica de INTA San Carlos. Los círculos representan valores significativos al nivel $p < 0,05$.

La variabilidad del crecimiento radial de *P. nigra ssp. salzmännii* es influenciada en forma positiva por los valores de las precipitaciones durante los meses de agosto y octubre ($r = 0,27$ y $0,37$, respectivamente; $p < 0,05$; Fig. 17). En lo que respecta a las temperaturas, emergió una relación negativa y estadísticamente significativa entre la cronología de datos

estandarizados y los valores de los meses de abril y mayo del año previo de crecimiento (para ambos $r = -0,31$, $p < 0,05$). Por otro lado, se observaron correlaciones negativas y significativas con los valores de temperatura invernal (julio: $r = -0,34$; $p < 0,05$) y primaverales (noviembre: $r = -0,50$; $p < 0,05$).

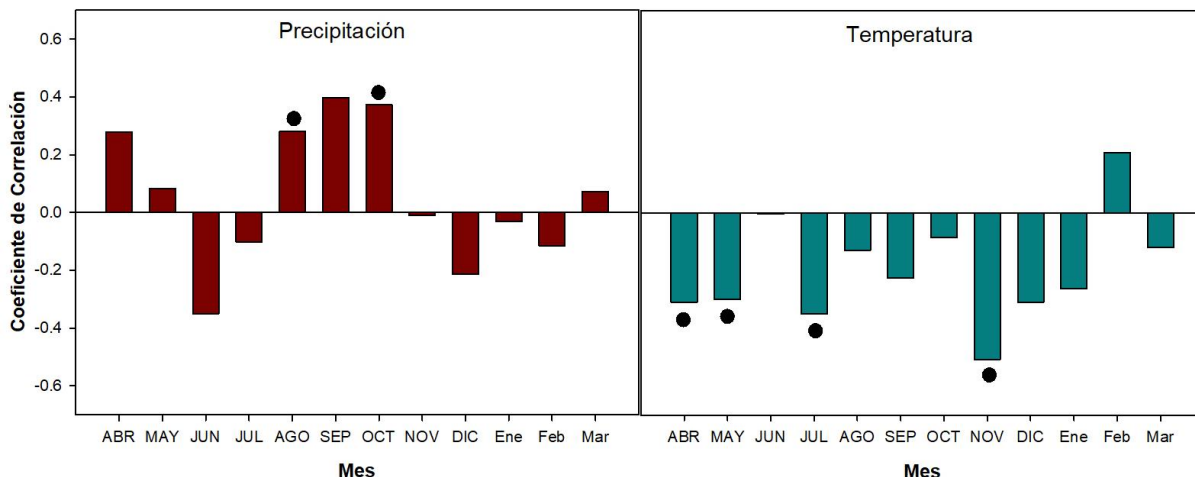


Figura 17: Coeficientes de correlación entre la cronología residual de *P. nigra* ssp. *salzmannii* y los valores de precipitación total mensual (izquierda) y de temperatura promedio mensual (derecha) de la estación meteorológica de INTA San Carlos. Los círculos representan valores significativos al nivel $p < 0,05$.

En la figura 18 se presentan las variaciones anuales en el incremento radial estandarizado y los valores promedio de temperatura para los meses de noviembre y diciembre, representando estos los meses de mayor influencia sobre el crecimiento de la totalidad de las subespecies analizadas. Se puede observar la sincronicidad de ambas variables a lo largo del periodo 2000-2021. Resultaron significativas las correlaciones para las subespecies *pallasiana* y *salzmannii* ($p = 0,01$ y $p = 0,05$, respectivamente), en concordancia con los valores mensuales presentados previamente.

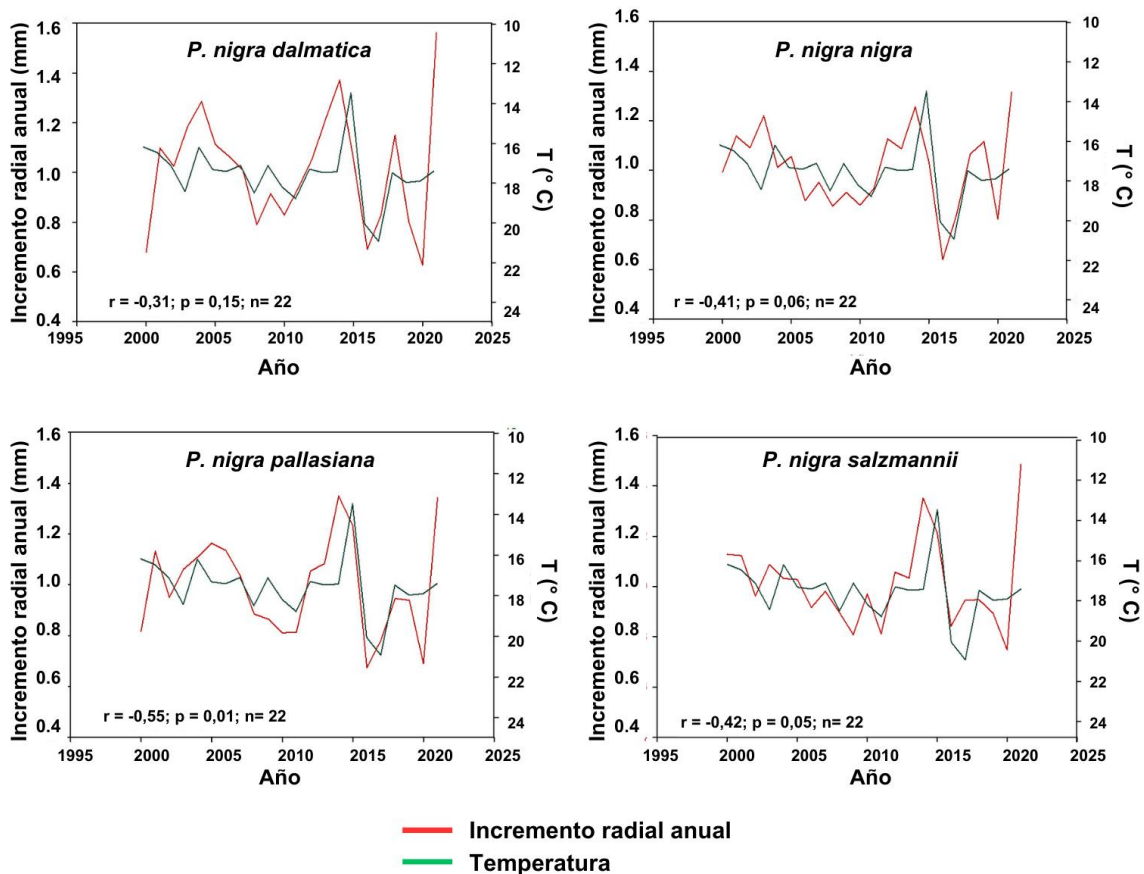


Figura 18: Función de correlación entre el promedio de las temperaturas Noviembre-Diciembre y el incremento radial anual de cada subespecie.

Finalmente, el cálculo de los años característicos negativos indicó que en el año 2016 se registró un incremento en los crecimientos estandarizados menor al 50% respecto a los valores históricos, registrado en el 100% de los individuos de las subespecies *P. nigra* ssp. *salzmannii*, *P. nigra* ssp. *dalmatica* y *P. nigra* ssp. *nigra*. Por otro lado, en el caso de la subespecie *P. nigra* ssp. *pallasiana*, solamente el 80% de los individuos examinados evidenciaron la presencia de un año característico negativo para el 2016. En lo que concierne a los valores del índice de aridez de De Martonne (IA), se procedió a examinar sus fluctuaciones para el intervalo que va desde agosto hasta diciembre del año de crecimiento, seleccionado en base a los resultados de las funciones de correlación presentados en las Figuras 14-17. Para el año 2016, se registró un valor de IA = 1,52. El mismo resulta superior al promedio de IA para el intervalo 1995-2021, igual a 1,13 (Figura 19).

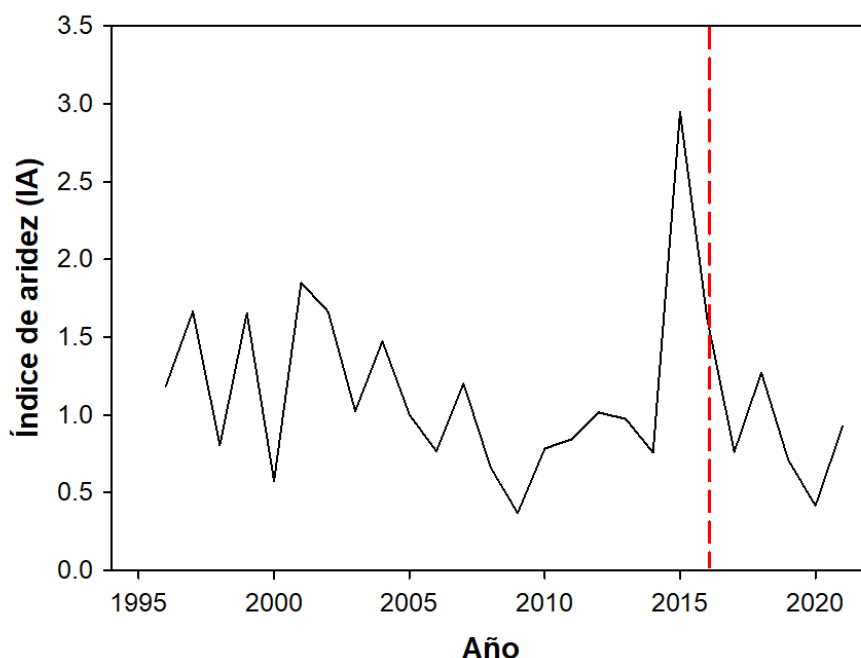


Figura 19: Índice de aridez de Martonne (IA) calculado como promedio de los meses de agosto a diciembre de cada año para el periodo 1995-2021. La línea punteada vertical roja corresponde al año característico negativo emergido en el año 2016.

4. DISCUSIÓN

En esta Tesina se analiza, por primera vez, la dinámica en el crecimiento radial a escala anual de diferentes subespecies pertenecientes a *P. nigra* creciendo en territorios de la Provincia de Mendoza. Esta información aporta datos novedosos a la extensa literatura existente sobre la respuesta ecológica de esta especie en su área de distribución natural, representando además el primer aporte como especie introducida en el Hemisferio Sur (Creus y Saz, 2001; Fkiri et al., 2010; Martín-Benito et al., 2010; Eilmann et al., 2012; Köse et al., 2012; Marchi et al., 2015).

Mediante técnicas dendrocronológicas, fue posible reconstruir las tasas de incremento radial, los crecimientos acumulados, y las relaciones entre fluctuaciones en el desarrollo del ancho de anillo y factores climáticos. Estos resultados ofrecieron información cuantitativa útil a una comparación entre cuatro subespecies de *P. nigra*, obteniendo además, qué subespecie presenta mejor aclimatación a las condiciones ambientales locales. No obstante en este estudio no se pudieron considerar, por falta de un seguimiento constante y existencia de registros, los valores de lámina de irrigación y su impacto sobre el crecimiento de los individuos examinados. Tales hallazgos proporcionan datos de interés para los productores forestales localizados en el territorio de la Provincia de Mendoza, representando esta Tesina un antecedente que podrá ser utilizado para establecer nuevos cultivos con el pino negral.

Al momento de la construcción de las cronologías de anillos de crecimiento, se logró fechar, medir y cofechar con éxito el 96% de las muestras. La posibilidad de utilizar este elevado porcentaje del material extraído indica la confiabilidad de los datos volcados en esta tesina en representar la dinámica del crecimiento radial de las subespecies analizadas, no obstante la relativamente reducida cantidad de material dendrocronológico.

Los valores del índice IC sugieren la existencia de un forzante común a los árboles examinados, posiblemente de origen climático, aunque no es posible descartar la influencia ejercida por el riego sobre la concordancia en las fluctuaciones en el crecimiento de las diferentes subespecies. En un estudio llevado a cabo de los Apeninos centrales con individuos jóvenes (12-20 años de edad) de *P. nigra* ssp. se observaron valores de IC similares a la presente Tesina (IC = 0,54 - 0,73; Tonelli et al., 2020). Por otro lado, estudios sobre *P. nigra* ssp. *salzmannii* en España (lugar de distribución natural de la subespecie en cuestión) indican valores de IC entre 0,44 y 0,55, a la vez que valores de AC1 entre 0,55 y 0,80 (Navarro et al., 2014). En un estudio llevado a cabo en una plantación artificial con diferentes variedades de *P. nigra*, emergen valores de AC1 superiores a 0,70 en todas las procedencias de *P. nigra* estudiadas, similarmente a los obtenidos en este estudio (Fkiri et al., 2010). En lo que corresponde al índice estadístico SM, en este estudio surgieron valores que varían entre 0,37 y 0,45 en las diferentes subespecies. Estudios realizados en bosques naturales de *P. nigra* ssp. indican valores de SM que fluctúan entre 0,23 y 0,37 (Camarero et al., 2013). En este sentido entonces, emerge una coherencia entre los valores de IC, AC y SM obtenidos en esta Tesina con los de la literatura sobre *P. nigra* ssp, sugiriendo que las cronologías construidas proveyeron de datos robustos y confiables útiles al análisis dendroecológico y dendroclimatológico aquí desarrollado.

Gracias a la estimación de los crecimientos diametrales acumulados, fue posible obtener resultados comparativos en relación a la productividad de las diferentes subespecies examinadas. En este sentido, se observó que *P. nigra* ssp. *dalmatica* y *P. nigra* ssp. *pallasiana* se destacaron como las variedades de mayor desarrollo durante un período en común de 28 años. En relación a la primera subespecie, no aparecen en la literatura científica trabajos que especifiquen las condiciones climáticas del área de su distribución natural. Por otro lado, como ha sido indicado en la sección 2.2, *P. nigra* ssp. *pallasiana* se distribuye en áreas caracterizadas por valores anuales de precipitación (400-800 mm) menores respecto a *P. nigra* ssp. *salzmannii* y *P. nigra* ssp. *nigra* (ambas 700-1500 mm). La reducida extensión de la parcela examinada en esta Tesina permite asumir una influencia uniforme del riego sobre el desarrollo radial de todos los individuos analizados. Sin embargo, sería de gran importancia examinar por donde ingresa el agua en el surco y su relación con la parte distal del mismo, ya que el efecto de microsectores con acumulación de agua dentro de la parcela pueden ser diferenciales en el desarrollo radial de los individuos analizados. Posiblemente, *P. nigra* ssp. *pallasiana* presente adaptaciones fisiológicas a condiciones de mayor aridez en comparación con las otras variedades, reflejo de los rasgos adaptativos locales de la misma en su área de distribución natural. Estas características auto-ecológicas podrían entonces explicar los mayores incrementos diametrales cumulativos emergidos para esta subespecie, si hipotetizamos una mejor capacidad de aclimatación a las condiciones climáticas semi-áridas del sitio examinado (Köse et al., 2012).

Los resultados de este estudio indican que las fluctuaciones en el crecimiento radial de las diferentes subespecies analizadas de *P. nigra* no mostraron diferencias estadísticamente significativas durante el período 2000-2021. Esta observación contrasta con los hallazgos documentados por Fkiri et al. (2010) en una investigación llevada a cabo en condiciones artificiales sin aporte de riego complementario. En el estudio mencionado, emergieron diferencias estadísticamente significativas en los valores de ancho de anillo promedio en lo que respecta a cuatro subespecies de pino negral, más precisamente, *P. nigra* ssp. *salzmannii*, *P. nigra* ssp. *nigra*, *P. nigra* ssp. *pallasiana* y *P. nigra* ssp. *laricio*. Los autores indican menores tasas de crecimiento radial para *P. nigra* ssp. *nigra* comparada con las restantes subespecies, e interpretan sus hallazgos en función de las adaptaciones de las subespecies a diferentes tipos de suelo (Fkiri et al., 2010). Por otro lado, estudios previos examinaron las posibles diferencias en el crecimiento de *P. nigra* y otras coníferas entre rodales naturales e individuos además sometidos a la aplicación de una lámina de riego (Feichtinger et al., 2014). En tales análisis, emergieron diferencias significativas pero exclusivamente en aquellos rodales cuyo crecimiento dependía de las temperaturas y de los valores de precipitación, mientras que tales diferencias eran ausentes para los individuos creciendo con aporte suplementario de recurso

hídrico (Feichtinger et al., 2014). Estos últimos, por otro lado, evidenciaban mayores tasas de incremento radial en comparación a los individuos que se desarrollaron en condiciones naturales (Feichtinger et al., 2014). Los autores explican estos resultados hipotetizando una posible extensión temporal del período de crecimiento vegetativo para los árboles sometidos a irrigación, probablemente consecuencia de la mayor disponibilidad de recurso hídrico y su posterior utilización en los procesos fisiológico de la especie, entre ellos la actividad del cambium vascular y por ende el desarrollo de los anillos anuales (Feichtinger et al., 2014). En este sentido, a la luz de lo previamente expuesto, podría considerarse que el aporte de agua de riego haya uniformado las variaciones inter-anales en las tasas de crecimiento de los individuos pertenecientes a las diferentes subespecies examinadas en este estudio, minimizando de tal manera las posibles respuesta dependientes de sus características autoecológicas.

Los resultados de las funciones de correlación evidenciaron la preponderancia de la influencia de las temperaturas sobre el crecimiento radial, siendo menor el efecto de las precipitaciones sobre la variabilidad anual en el ancho de los anillos. Por otro lado, emergieron algunos resultados diferenciales en la señal dendroclimatológica de las subespecies de *P. nigra*. En este sentido, las subespecies *P. nigra* ssp. *salzmannii*, *P. nigra* ssp. *pallasiana* y *P. nigra* ssp. *nigra* presentaron correlaciones negativas con los valores de temperatura durante las temporadas de otoño e invierno del año previo al crecimiento, y de primavera y comienzo de verano del año corriente, emergiendo una relación estadísticamente significativa con esta última estación exclusivamente para *P. nigra* ssp. *pallasiana*. Por otro lado, *P. nigra* ssp. *dalmatica* no exhibió relaciones significativas entre la temperatura y las fluctuaciones en el ancho del anillo anual. En lo que corresponde a la relación con los valores mensuales de precipitación, la disponibilidad del recurso hídrico en el transcurso del final de invierno/principio de primavera y principio de la temporada de crecimiento presentó una influencia positiva sobre el crecimiento radial de *P. nigra* ssp. *salzmannii* y *P. nigra* ssp. *pallasiana*, respectivamente, mientras que emergió una señal dendroclimatológica de signo negativo entre el aporte meteórico del mes de junio del año previo al crecimiento y las tasas de incremento radial para *P. nigra* ssp. *dalmatica*.

Estudios previos han indicado la influencia de los forzantes climáticos sobre la dinámica en el crecimiento radial de *P. nigra* spp. en su área de distribución natural. En lo que respecta a la temperatura, estudios dendroclimatológicos realizados en zonas áridas de Anatolia occidental indican que *P. nigra* ssp. *pallasiana* exhibe, al igual que lo observado en esta Tesina, una vinculación negativa con tal variable en la estación primaveral (Köse et al., 2012). Este resultado, según los autores, puede ser interpretado considerando que elevadas temperaturas durante la primavera e inicios de verano implican un incremento de los procesos de evapotranspiración, con consecuente disminución del recurso hídrico disponible en suelos para el crecimiento radial de la subespecie (Köse et al., 2012). Por otro lado, altas temperaturas pueden inducir procesos de disminución del recurso hídrico en los primeros horizontes de suelo, explorados por el sistema radicular superficial, con consecuente disminución del tamaño de las acículas, reducción de la capacidad fotosintética, y por ende de la disponibilidad de azúcares utilizados para el desarrollo de nuevo tejidos, particularmente el xilema (Oberhuber et al., 1998; Köse et al., 2012). En lo relativo a *P. nigra* ssp. *salzmannii*, existe evidencia científica que indica la presencia de una relación negativa con los valores de temperaturas de los meses invernales, y paralelamente un vínculo indirecto con las condiciones térmicas del periodo otoñal previo al crecimiento radial, coherentemente con los hallazgos de esta pesquisa (Martin-Benito et al., 2010). En forma similar a lo previamente expuesto, elevadas temperaturas pueden inducir una disminución de la capacidad de almacenamiento de los productos fotosintéticos como consecuencia de la menor actividad fisiológica de la planta y su posterior influencia sobre la actividad de la zona cambial (Creus y Saz, 2001; Fkiri et al., 2010; Martin-Benito et al., 2010).

Como fue expuesto previamente, en esta investigación emergieron correlaciones positivas y significativas entre los valores de precipitación y las tasas de incremento radial durante el periodo correspondiente a la activación del cambio vascular para las cronologías de *P. nigra*

ssp. *salzmannii* y *P. nigra* ssp. *pallasiana*. A diferencia de lo encontrado en esta Tesina, en su área de distribución natural el aporte de agua meteórica durante el periodo primaveral ejerce una influencia negativa sobre el crecimiento de *P. nigra* ssp. *salzmannii* (Creus y Saz, 2001). Los autores interpretan este resultado considerando que en estos territorios, las precipitaciones primaveral presentan carácter nívico, no beneficiando el comienzo de la actividad vegetativa (Creus y Saz, 2001). Por el contrario, estudios previos indican para *P. nigra* ssp. *pallasiana* en Anatolia Occidental un efecto positivo de las precipitaciones de invierno y comienzo de primavera sobre el crecimiento radial, debido a una mayor disponibilidad del recurso hídrico utilizable en los diferentes procesos fisiológicos de la planta (Köse et al., 2012). Finalmente, la ausencia de una señal dendroclimatológica relativa a la relación precipitación/crecimiento radial registrada para *P. nigra* ssp. *nigra* podría vincularse a que el riego asistido conduciría a una supresión de las respuestas de crecimiento en relación a la precipitación natural (Feichtinger et al., 2014). Otros estudios fisiológicos podrían ser desarrollados para examinar en mayor detalle este resultado.

En el análisis de las diferentes subespecies de *P. nigra* llevada a cabo en esta Tesina, vale la pena mencionar especialmente los resultados del análisis dendroclimatológico para *P. nigra* ssp. *dalmatica*. A pesar de que la temperatura no ejerce una influencia significativa en el crecimiento de esta subespecie, se destaca una relación significativamente negativa entre la precipitación y el crecimiento durante el mes de junio, en contraste con las otras subespecies. Aunque no se han encontrado estudios dendroclimatológicos relativos a esta subespecie, los hallazgos obtenidos en esta Tesina podrían interpretarse gracias a los resultados de Köse et al. (2012). Estos autores identificaron que las precipitaciones invernales pueden tener un impacto negativo en el crecimiento radial de *P. nigra* ssp. *pallasiana*, debido a que la presencia de una capa de nieve durante este mes reduce las temperaturas del suelo y retrasa el inicio del período vegetativo. Los hallazgos de esta Tesina confirman por ende la diversidad de las relaciones entre clima y crecimiento de *P. nigra* obtenidas en estudios previos, reflejo de la heterogeneidad ambiental propia del área de su distribución natural (Fernández et al., 1996). En este sentido entonces, emerge como la vinculación con los diferentes forzantes climáticos puede variar según el origen de las diversas subespecies, determinando por ende la capacidad de los individuos arbóreos de aclimatarse a las condiciones ambientales locales en ambientes externos a su distribución natural (Versace et al., 2022).

En lo relativo al riego, como fue mencionado en varias ocasiones a lo largo de esta investigación, no fue posible cuantificar la relación de este factor con la dinámica en el crecimiento radial de los árboles examinados. Según Perulli et al. (2022), el aporte de una lámina de riego a una plantación debería implicar la ausencia de relaciones estadísticamente significativas obtenidas del cálculo de las funciones de correlación entre el crecimiento radial de una especie leñosa y los forzantes climáticos. Sin embargo, en este estudio, la presencia de señales dendroclimatológicas relacionadas con la influencia de la precipitación indican una dependencia directa del crecimiento radial de las condiciones hídricas meteóricas, y por ende sugieren que la aplicación del recurso hídrico artificial podría haber sido insuficiente (Perulli et al., 2022). En este mismo sentido, los resultados del análisis de los años característicos indican con gran representatividad que el año 2016 fue caracterizado por un crecimiento menor a los valores históricos de esta plantación. Considerando que para este año, al igual que para los años anteriores, el índice de aridez presenta valores mayores al promedio histórico para el área examinada, puede asumirse que el bajo crecimiento registrado no haya dependido de condiciones climáticas adversas. Podría hipotetizarse por ende que para este año, el riego no cubrió las necesidades hídricas de los individuos de pino negral analizados. Esto no se reflejó, con la misma magnitud que lo registrado por las otras subespecies, para *P. nigra* ssp. *pallasiana*, resultado que sugiere una posible mayor capacidad de aclimatación de estos individuos a las condiciones climáticas representativas del área examinada localizada en el territorio mendocino. Esta interpretación se complementa con los antecedentes descritos previamente al encontrar registros de esta subespecie en condiciones semiáridas en el centro de Turquía, caracterizados por los valores más bajos de precipitación

media anual en toda el área de distribución natural de *P. nigra* (aproximadamente 400 mm; Köse et al., 2012).

5. CONCLUSIONES

Este estudio examinó por primera vez y mediante métodos dendrocronológicos, el comportamiento del crecimiento de individuos de diferentes subespecies de *P. nigra* plantados en la Provincia de Mendoza. El análisis de esta especie es particularmente importante debido a la inexistencia de trabajos dendrocronológicos previos sobre esta especie en el Hemisferio Sur. A partir de esta investigación, fue posible obtener información cuantitativa y comparativa entre subespecies acerca de la variabilidad en el crecimiento radial anual, las tasas de incremento diametral acumulado, y la relación entre fluctuaciones en la precipitación y la temperatura y variaciones en el crecimiento para áreas del sur de Mendoza. Se reveló que el crecimiento de las subespecies de *P. nigra* en el área de estudio está fuertemente influenciado en primer lugar por los valores de la temperatura, aunque también la precipitación desempeña un papel importante en su crecimiento. La subespecie *P. nigra* ssp. *pallasiana* representa, en base a los hallazgos evidenciados en esta investigación, la variedad con mayor potencialidad como forestal para la matriz productiva provincial, debido a su mejor adaptabilidad inferida por sus elevados crecimientos comparados a las otras subespecies, a la vez que su menor dependencia hacia las condiciones climáticas locales.

Las condiciones de plantación son importantes al considerar el potencial crecimiento que una especie puede lograr bajo un manejo adecuado del cultivo. En este sentido, emergió en esta Tesina como las condiciones térmicas del período de fin de primavera/comienzo de verano y, en menor medida, la disponibilidad de recurso hídrico a principio de la temporada de crecimiento radial, determinan los crecimientos de las diferentes subespecies examinadas. Así mismo, aunque no existió dentro de la parcela de estudio un registro de la cantidad de agua suministrada, esta expresión fisiológica, indica que, para aumentar la productividad del pino negral en los territorios del sur mendocino, es recomendable proveer una lámina de riego de manera constante en el transcurso de esta ventana temporal. Estas consideraciones son esenciales para aplicar buenas prácticas de manejo forestal sobre estos pinares.

En última instancia, esta tesina de grado sienta las bases para futuras pesquisas que podrán enriquecer y expandir la matriz productiva forestal en la provincia de Mendoza. Estas investigaciones tienen el potencial de contribuir al desarrollo económico de los productores forestales, brindando oportunidades en un contexto de inversión incierta debido a las cambiantes condiciones climáticas.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Abraham, E.M. & Prieto, M.R. (1999). *Vitivinicultura y desertificación en Mendoza*. IPGH, 109–135.
- Abraham, E.M, del Valle, H. F., Roig, F., Torres, L., Ares, J. O., Coronato, F., & Godagnone, R. (2009). *Overview of the geography of the Monte Desert biome (Argentina)*. *Journal of Arid Environments*, 73, 144-153.
- Allen, C.D., Breshears, D.D., McDowell, N.G. (2015). *On underestimation of global vulnerability to tree mortality and forest die-off from hotter drought in the Anthropocene*. *Ecosphere* 6, 1–55.
- Bastin, J. F., Berrahmouni, N., Grainger, A., Maniatis, D., Mollicone, D., Moore, R., ... & Castro, R. (2017). *The extent of forest in dryland biomes*. *Science*. 356(6338), 635-638.
- Biondi F., & Waikul K. (2004). *DENDROCLIM2002: program for statistical calibration of climate signals in tree-ring chronologies*. *Computers & Geosciences*, 30(3), 303-311. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2003.11.004>
- Calderón, A. D., & Mastrantonio, L. (2000). *Rendimiento de rollizos de álamo según clases diamétricas*. *Biblioteca digital UNCUYO*, 32 (1), 89-94. <http://bdigital.uncu.edu.ar/11071>
- Calderón A. D., Bustamante J. A., Riu N. E., & Perez S. A. (2004). *Comportamiento de coníferas bajo riego en dique yaucha Provincia de Mendoza, Argentina*. *Biblioteca digital UNCUYO*, 36(2), 1-6. <https://bdigital.uncu.edu.ar/2676>.
- Calderón A. D., Bustamante J. A., Riu N. E., & Perez S. A. (2008). *Comportamiento de procedencias de Pinus nigra bajo riego en Dique Yaucha, Mendoza, Argentina*. *Biblioteca digital UNCUYO*, 40(2), 11-17. <https://bdigital.uncu.edu.ar/2706>
- Camarero, J., Manzanedo R., Sanchez-Salguero R. & Navarro-Cerrillo. (2013). *Growth response to climate and drought change along an aridity gradient in the southernmost Pinus nigra relict forests*. *Annals of Forest Science*,70,769–780.
- Climent, J., Chambel, M. R., Santos del Blanco, L., Martínez Valcuende, L., & Alía, R. (2013). *Esclareciendo la variación adaptativa entre subespecies y procedencias de Pinus nigra Arnold*. VI Congreso Forestal Español.
- Cook, E.R., & Krusic, P.J. (2006). *ARSTAN 41: a tree-ring standardization program based on detrending and autoregressive time series modeling, with interactive graphics*. TreeRing Laboratory, Lamont Doherty Earth Observatory of Columbia University, New York.
- De Martonne, E. (1926). *Aréisme et Indice d'aridité*. *Comptes Rendus de L'Academy of Science*, Paris, 1395-1398.
- De Pauw, E., Göbel, W., & Adam, H. (2000). *Agrometeorological aspects of agriculture and forestry in the arid zones*. *Agricultural and Forest Meteorology*, 103(1-2), 43-58.
- FAO (1977). *Carte mondiale de la désertification à l'échelle de 1:25,000,000*. *Conférence des Nations Unies sur la désertification*. A/CONF. 74/2.
- Feichtinger, L. M., Eilmann, B., Buchmann, N., & Rigling, A. (2014). *Growth adjustments of conifers to drought and to century-long irrigation*. *Forest Ecology and Management*, 334, 96-105. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.08.008>.

- Fernández-Golfín, J.I., Díez, M.R., Baonza, M.V., Gutiérrez, A., Hermoso, E., Conde, M., & Van den Eynde, V. (2001). *Caracterización de la calidad y las propiedades de la madera de Pino Laricio (Pinus nigra Arn. Salzmännii)*. Sist. Recur. For. Vol. 10 (2), 312-329.
- Ferriol Molina, M. (2022). *El pino salgareño (Pinus nigra L.)*. <http://hdl.handle.net/10251/183463>
- Fkiri, S., Guibal, F., Fady, B., Khorchani, A. E., Khaldi, A., Khouja, M. L., & Nasr, Z. (2010). *Tree-rings to climate relationships in nineteen provenances of four black pines sub-species (Pinus nigra Arn.) growing in a common garden from Northwest Tunisia*. Dendrochronologia. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2018.05.001>.
- Frangi, J.L., Perez, C.A., Martiarena, R.A., Pinazo, M.A., Martínez G.J. et al. (2015) *Aspectos ecológicos y ambientales de los bosques nativos y plantaciones forestales en la Argentina: Una visión panorámica y conceptual*. Fundación Ciencia, Educación y Cultura, 4, 365-432.
- Fritts, H. C. (1976). *Tree Rings and Climate*. Academic Press, London.
- Gonzalez, I. G. (2001). *Weiser: a computer program to identify event and pointer years in dendrochronological series*. Dendrochronologia 19, 239-244.
- Holmes R.L. (1983). *Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement*. *Tree-Ring Bulletin*, 43, 69–78.
- INFOSTAT/P. (2008). *Infostat profesional*. UNC, FCA, Córdoba, Argentina.
- Isaac-Renton, M., Montwé, D., Hamann, A. (2018). *Northern forest tree populations are physiologically maladapted to drought*. Nat Commun 9, 5254. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-07701-0>
- Isajev, V., Fady, B., Semerci, H., & Andonovski, V. (2009). *Guía técnica para la conservación genética y utilización del pino laricio (Pinus nigra)*. EUFORGEN.
- Jetschke, G., Van der Maaten, E. & Van der Maaten-Theunissen, M. (2019). *Towards the extremes: A critical analysis of pointer year detection methods*. Dendrochronologia, 53, 55-62. DOI:[10.1016/j.dendro.2018.11.004](https://doi.org/10.1016/j.dendro.2018.11.004)
- Köse, N., Akkemik, Ü., Dalfes, N., Özeren, M. y Tolunay, D. (2012). *Tree-ring growth of Pinus nigra Arn. subsp. pallasiana under different climate conditions throughout western Anatolia*. Dendrochronologia, 30, 295-301.
- Lindner M., Maroschek M., Netherer S., Kremer A., Barbati A., Garcia G., Seidl R., ... (2010). *Climate change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest ecosystems*. Forest Ecology and Management. 256, 608-709. DO - 10.1016/j.foreco.2009.09.023
- Maestre, F. T., Benito, B. M., Berdugo, M., Concostrina- Zubiri, L., Delgado- Baquerizo, M., Eldridge, D. J., ... & Soliveres, S. (2021). *Biogeography of global drylands*. New Phytologist. 231(2), 540-558.
- Martín-Benito, D., Del Rio, M. & Canellas, I., (2010). *Black pine (Pinus nigra Arn.) growth divergence along a latitudinal gradient in Western Mediterranean Mountains*. Annals of Forest Science 67(4), 401.
- Martin-Benito, D., Hans, B. & Isabel, C. (2013). *Influence of drought on tree rings and tracheid features of Pinus nigra and Pinus sylvestris in a mesic Mediterranean forest*. European Journal of Forest Research 132, 33–45.
- Martin, F. (2007/2008). *Innovaciones tecnológicas e impactos territoriales en el sistema agroalimentario de Mendoza*. Revista de Geografía - Nº 7 - pág. 26-45 (2007/2008)

- Matteucci, S. D., Martínez Pastur, G. J., Lencinas, M. V., Rovere, A., Amoroso, M. M., Barberis, I. M., ... & Peri, P. L. (2021). *Breve descripción de las regiones forestales de la Argentina*.
- Maxwell, R. S., & Larsson, L. A. (2021). *Measuring tree-ring widths using the CooRecorder software application*. *Dendrochronologia*, 67, 125841.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de la Nación (MAyDS). (2014). Unidad de Manejo del Sistema de Evaluación Forestal (UMSEF). Regiones Forestales de Argentina. Mapas Ambientales. <http://mapas.ambiente.gob.ar/>
- Morello J. (1958). *La Provincia Fitogeográfica del Monte*. Opera Lilloana 2, 5-115.
- Navarro-Cerrillo, Sánchez-Salguero, Manzanedo, Camarero & Fernández-Cancio. (2014). *Site and age condition the growth responses to climate and drought of relict pinus nigra subsp. salzmannii populations in southern Spain*. *Tree-Ring Research* 70(2), 145-155. DOI:10.3959/1536-1098-70.2.145
- Piraino S. & Roig F. (2017). *Diferencias en el hábito de crecimiento como variable explicativa de la influencia climática en Prosopis flexuosa en el Desierto del Monte Central (Argentina)*. *Bol. Soc. Argent. Bot.* 52 (3), 523-533.
- Perulli, G.D., Peters, R.L., von Arx, G., Grappadelli, L.C., Manfrini, L. & Cherubini, P. (2022). *Learning from the past to improve in the future: tree-ring wood anatomy as retrospective tool to help orchard irrigation management*. *Acta Hort.* 1335, 179-188. DOI: 10.17660/ActaHortic.2022.1335.21
- Priya PB, & Bhat KM. (1999). *Influence of rainfall, irrigation and age on the growth periodicity and wood structure in Teak (Tectona grandis)*. *IAWA J.* 20:181–192.
- Quézel, P., & Médail, F. (2003). *Ecologie et Biogéographie du Bassin Méditerranéen*. Elsevier.
- Schulman, E. (1956). *Dendroclimatic changes in semiarid America*. University of Arizona Press, Tucson.
- Schweingruber, F. H., D. Eckstein, F. Serre-Bachet, & O. U. Bräker. (1990). *Identification, presentation and interpretation of event years and pointer years in dendrochronology*. *Dendrochronologia* 8,9-38.
- Speer J.H. (2009). *Fundamentals of Tree-Ring Research*.
- Stokes, M. A., & Smiley, T. L. (1968). *An Introduction to Tree-Ring Dating*. University of Arizona Press.
- Thompson, J.D. (2005). *Plant Evolution in the Mediterranean*. Oxford University Press, New York, USA.
- Thurm E. A., Hernandez L., Baltensweiler A., Ayan S., Rasztovits E., Bielak K., Zlatanov T., Hladnik D., ... (2018). *Alternative tree species under climate warming in managed European forests*. *Forest Ecology and Management*, 430, 485-497. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.08.028>.
- Tonelli, E., Vitali, A., Piermattei, A., & Urbinati, C. (2020). *Are young trees suitable for climate-growth analysis? A trial with Pinus nigra in the central Apennines treeline*. *Dendrochronologia*, 62, 125720. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2020.125720>.
- Versace S., Bräuning A., Cherubini P., Di Febbraro M., Häusser M., Lombardi F., Marchetti M., Marziliano P.A., Salbitano F., Szymczak S., Tognetti R. (2022) *New evidence for population-specific responses to drought events from tree ring chronologies of Pinus nigra ssp. laricio across the entire distribution range*. *Agricultural and Forest Meteorology*, 323, 109076. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2022.109076>

- Villalba, R. & Veblen, T.T. (1997) *Spatial and temporal variation in Austrocedrus growth along the forest-steppe ecotone in northern Patagonia*. *Can J For Res* 27:580–597
- Villagra, P.E., Defossé, G.E., Del Valle, H.F., Tabeni, S., Rostagno, M., Cesca, E., Abraham, E. (2009). *Land use and disturbance effects on the dynamics of natural ecosystems of the Monte Desert: Implications for their management*. *Journal of Arid Environments*, 73(2), 202-211.
- Villagra, P.E., Juan A. Alvarez, Marcos Karlin, Pablo A. Meglioli, Cecilia Vega Riveros, Ricardo Zapata, Elena M. Abraham, Leandro Alvarez, Valeria Aschero, Erica Cesca, Rubén Coirini, Mariano Cony; Gabriel Gatica; Ulf O. Karlin, Edgardo Melián; Sebastián Mora; Mariano S. Morales; María R. Prieto, Eduardo Pucheta; Yanina Ribas; Sergio A. Roig, Facundo Rojas; Andrés G. Rolhauser; Cecilia Rubio, Clara Rubio, Carmen Sartor y Alejandro Tonolli. (2020). Bosques de la región del Monte. In *Uso Sustentable del Bosque Nativos | Aportes desde la Silvicultura Argentina*, 2–100.
- Wang, L., Jiao, W., MacBean, N., Rulli, M. C., Manzoni, S., Vico, G., & D'Odorico, P. (2022). *Dryland productivity under a changing climate*. *Nature Climate Change*. 12(11): 981-994.