

# Anillos de crecimiento anual en *Prosopis L.* y su relación con el clima en el litoral del Río Uruguay

Tesis de la Maestría en Ciencias Biológicas (PEDECIBA)  
Orientación Ecología y Evolución

**Serrana Ambite Gonzalez**

Tutor: Christine Lucas  
Co-tutor: Alejandro Brazeiro





(Crédito foto de portada  
C. Lopez Gonzalez)

# **Anillos de crecimiento anual en *Prosopis L.* y su relación con el clima en el litoral del Río Uruguay**

Tesina de la Maestría en Ciencias Biológicas (PEDECIBA)  
Orientación Ecología y Evolución

**Serrana Ambite Gonzalez**

Tutor: Christine Lucas

Co-tutor: Alejandro Brazeiro

Tribunal:

Marcelo Barreiro

Mauricio Bonifacino

Carolina Toranza

CENUR Litoral Norte | Universidad de la República | Facultad de Ciencias

Septiembre 2022

### **Agradecimientos**

Dedicada a todas las mujeres que me han apoyado durante mi carrera. A mi tutora, mis jefas, mis docentes y compañeras que me impulsaron compartiendo sus saberes y experiencias.

Gracias.





## Resumen

En las últimas décadas, han ido en aumento los esfuerzos por mejorar el entendimiento de la variabilidad histórica del clima en el sureste de América del Sur. Una valiosa herramienta a la hora de evaluar y reforzar los registros climáticos es la Dendrocronología, el estudio de los anillos de crecimiento en plantas leñosas, la cuál ha contribuido a la reconstrucción de la frecuencia y severidad de la variabilidad climática y sus impactos en los ecosistemas. Sin embargo, en regiones tropicales y subtropicales de baja elevación, cómo la región Pampeana, los datos dendrocronológicos se encuentran limitados. Un género que ha demostrado alto potencial dendrocronológico en América del Sur es *Prosopis* L., encontrándose ampliamente distribuido, presentando anillos anuales y especies longevas. Este trabajo evalúa la relación entre el crecimiento anual de *Prosopis affinis* (Spreng) y *Prosopis nigra* (Griseb) Hieron., dos especies nativas del bosque parque uruguayo, y la variabilidad climática regional y global, a través de análisis dendrocronológicos. Se presenta una revisión de los estudios entre la relación del crecimiento en *Prosopis* y la hidrología en América del Sur y tres cronologías de ancho de anillo en tres sitios en el noreste de Uruguay, usando 80 series (radios de medición) de 41 árboles. Se realizó la datación cruzada de los anillos anuales y se comparó el crecimiento en el período de 1897 a 2008 con la variabilidad climática, incluyendo precipitación, temperatura, Índice Estandarizado de Precipitación-Evaporación (SPEI), índice reconstruido de Sequías de Sudamérica (SADA), El Niño Oscilación Sur (ENOS), Modo Anular del Sur (SAM), Índice de Oscilación Sur (SOI) e índice de Humedad en Suelo (FLDAS). Este trabajo es el primero en demostrar el potencial dendrocronológico del género *Prosopis* en Uruguay, con cronologías con una señal poblacional expresada (Expressed Population Signal (EPS)) >0,80 en los tres sitios. La variabilidad del ancho de anillo estuvo fuertemente correlacionada con la disponibilidad de agua. El crecimiento estuvo positivamente correlacionado ( $r=0,39^{***}$ ;  $r=0,38^{***}$ ) con la precipitación acumulada en primavera-verano de la temporada de crecimiento en las dos cronologías ubicadas en sitios altos (SA) (43-48 msnm), y negativamente correlacionado ( $r=-0,31^{**}$ ) con la precipitación acumulada a fines del invierno e inicios de la temporada de crecimiento, con la cronología ubicada en el sitio bajo (SB) (16 msnm). Además de la importancia de las condiciones locales, otras variables climáticas fueron clave, corroboradas por la correlación positiva ( $r=0,27^{**}$ ;  $r=0,42^{***}$ ) de SA y la correlación negativa ( $r=-0,31^{**}$ ) de SB con SPEI; y la correlación negativa ( $r=-0,29^{***}$ ;  $r=-0,39^{***}$ ) de SA y la correlación positiva ( $r=0,23^{**}$ ) de SB con la temperatura. Los índices ENOS, SAM y SOI se correlacionaron con las cronologías, a través de sus efectos en el régimen de precipitaciones y temperatura. Estos hallazgos reflejan el potencial del género *Prosopis* - inclusive en Uruguay - para la investigación dendrocronológica y la reconstrucción climática en la región, aportando al entendimiento de la relación entre el crecimiento leñoso de bosques nativos y la variabilidad histórica del clima.

**Palabras clave:** Dendrocronología; Variabilidad climática; América del Sur; *Prosopis affinis*; *Prosopis nigra*

Nota: \*  $p<0.01$ , \*\*  $p<0.01$ , \*\*\* $p<0.001$

Al momento de publicar esta Tesis, el género *Prosopis* L. fue desintegrado, quedando las especies nativas presentes en Uruguay bajo el género *Neltuma* Raf. (Hughes et al. 2022. Disintegration of the genus *Prosopis* L. (Leguminosae, Caesalpinioideae, mimosoid clade). *PhytoKeys* 205: 147-189  
doi: 10.3897/phytokeys.205.75379

## Abstract

In recent decades, there are increasing efforts to understand historical climate variability in southeastern South America. Dendrochronology -the study of growth rings in woody plants- is a valuable tool for evaluating climate records and has contributed to the reconstruction of the frequency and severity of climate variability and its impacts on ecosystems. In low-elevation tropical and subtropical regions, such as the Pampean region, dendrochronological data are limited. The genus *Prosopis* L. has shown high dendrochronological potential in South America, being widely distributed, long-lived, and presenting annual rings. This study evaluates the relationship between the annual growth of *Prosopis affinis* (Spreng) and *Prosopis nigra* (Griseb) Hieron., two native species of the Uruguayan savanna, and regional and global climate variability, through dendrochronological analysis. A review of studies between the relationship of growth in *Prosopis* and hydrology in South America and three ring width chronologies at 3 sites in northeastern Uruguay, using 80 series (radius measurements) of 41 trees, is presented. Cross-dating of annual rings was performed and growth in the period from 1897 to 2008 was compared with climatic variability, including precipitation, temperature, Standardized Precipitation-Evaporation Index (SPEI), reconstructed South American Drought Index (SADA), El Niño Southern Oscillation (ENSO), Southern Annular Mode (SAM), Southern Oscillation Index (SOI) and Soil Moisture Index (FLDAS). This study is the first to demonstrate the dendrochronological potential of the genus *Prosopis* in Uruguay, with chronologies with an expressed population signal (EPS) >0.80 at all three sites. Ring width variability was strongly correlated with water availability. Annual growth was positively correlated ( $r=0.39^{***}$ ;  $r=0.38^{***}$ ) with accumulated precipitation in spring-summer of the growing season in the two chronologies located at high elevations (SA) (43-48 masl), and negatively correlated ( $r=-0.31^{**}$ ) with accumulated precipitation at the end of winter and the beginning of the growing season, for the chronology at the low-elevation site (SB) (16 masl). In addition to the importance of local conditions, other climatic variables were key, corroborated by the positive correlation ( $r=0.27^{**}$ ;  $r=0.42^{***}$ ) of SA and the negative correlation ( $r=-0.31^{**}$ ) of SB with SPEI, and the negative correlation ( $r=-0.29^{***}$ ;  $r=-0.39^{***}$ ) of SA and the positive correlation ( $r=0.23^{**}$ ) of SB with temperature. The ENSO, SAM and SOI indices were correlated with the chronologies, through their effects on rainfall and temperature regimes. These findings reflect the potential of the genus *Prosopis* - including in Uruguay - for dendrochronological research and climatic reconstruction in the region, contributing to the understanding of the relationship between the woody growth of native forests and the historical variability of the climate.

**Keywords:** Dendrochronology; climatic variability; South America; *Prosopis affinis*; *Prosopis nigra*

Note: \*  $p<0.01$ , \*\*  $p<0.01$  \*\*\* $p<0.001$

# Índice

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Capítulo 1: Introducción general.....</b>  | <b>1</b>  |
| Introducción.....   | 3         |
| Hipótesis y objetivos.....  | 6         |
| Referencias.....  | 8         |
| <b>Capítulo 2: Crecimiento leñoso en <i>Prosopis L.</i> en relación a la hidrología en América del Sur: una revisión.....</b>       | <b>15</b> |
| Resumen.....  | 17        |
| Introducción.....   | 19        |
| Objetivos.....  | 20        |
| Materiales y métodos.....   | 21        |
| Género <i>Prosopis L.</i> .....   | 21        |
| Revisión de la literatura y metanálisis.....  | 23        |
| Resultados y discusión.....   | 23        |
| Formación de anillos de crecimiento y anatomía del hidrosistema.....  | 27        |
| Dendroclimatología.....   | 29        |
| Dendrohidrología y agua subterránea.....  | 30        |
| Dendroecología y manejo del bosque.....   | 32        |
| Conclusiones.....   | 35        |
| Agradecimientos.....  | 36        |
| Referencias.....  | 37        |
| Anexo.....  | 45        |
| <b>Capítulo 3: Anillos de crecimiento anual en <i>Prosopis L.</i> y su relación con el clima en el litoral del Río Uruguay.....</b> | <b>49</b> |
| Resumen.....  | 51        |
| Introducción.....   | 53        |
| Objetivo.....   | 54        |
| Materiales y métodos.....   | 55        |
| Área de estudio.....  | 55        |
| Especie de estudio.....   | 57        |
| Diseño de estudio.....  | 57        |
| Muestreo y desarrollo de las cronologías.....   | 57        |
| Datos climáticos y análisis.....  | 59        |
| Análisis estadístico.....   | 59        |
| Resultados.....   | 60        |
| Anillos de crecimiento en <i>Prosopis L.</i> .....  | 60        |
| Patrones de crecimiento.....  | 61        |
| Relación crecimiento - clima.....   | 65        |
| Discusión.....  | 75        |
| Anillos de crecimiento anual en <i>Prosopis L.</i> .....  | 75        |
| Calidad de la cronología.....   | 76        |

|  |           |
|--|-----------|
| Crecimiento en árboles y clima.....            | 77        |
| Conclusiones.....                              | 82        |
| Agradecimientos.....                           | 83        |
| Referencias.....                               | 84        |
| Anexo.....                                     | 92        |
| <b>Capítulo 4: Conclusiones generales.....</b> | <b>95</b> |



## Índice de figuras

### Capítulo 2: Crecimiento leñoso en *Prosopis L.* en relación a la hidrología en América del Sur: una revisión

|  |    |
|--|----|
| Figura 1. Mapa de la distribución de los 83 sitios de estudio revisados para <i>Prosopis L.</i> en América del Sur, sobre regiones climáticas de Köppen.....   | 22 |
| Figura 2. Mapa de la distribución de los 83 sitios de estudio denotando la especie de <i>Prosopis L.</i> utilizada.....  | 25 |
| Figura 3. Mapa de la ubicación de los sitios de estudio por A) Precipitación media anual – PMA (mm) y B) Humedad del suelo media anual a 0-10 cm de profundidad (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )..... | 26 |
| Figura 4. Mapa de la ubicación de los sitios de estudio por Elevación (m.s.n.m.).....  | 26 |
| Figura 5. Número de artículos (N = 40) por A) Precipitación media anual (MAP), B) Humedad del suelo media anual a 0-10 cm de profundidad (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ) y C) Elevación (msnm).....  | 27 |

### Capítulo 3: Anillos de crecimiento anual en *Prosopis L.* y su relación con el clima en el litoral del Río Uruguay.

|   |    |
|---|----|
| Figura 1. Mapa de Uruguay indicando los sitios de muestreo de <i>Prosopis L.</i> .....  | 56 |
| Figura 2. Mapa satelital de la ubicación de los sitios de estudio (A) DAG, (B) LBU y (C) DRQ.....   | 56 |
| Figura 3. Sitios de estudio (A) DAG, (B) LBU y (C) DRQ.....   | 60 |
| Figura 4. Anillos de crecimiento anual en (A) <i>P. affinis</i> (Spreng.) y (B) <i>P. nigra</i> (Griseb) Hieron., observados a través de la lupa binocular.....   | 61 |
| Figura 5. Anomalías en las cronologías de índice de ancho de anillo y sequías históricas en Uruguay...62  |    |
| Figura 6. Cronologías estándar de anomalías en el ancho de anillo de <i>Prosopis L.</i> en el litoral oeste de Uruguay.....   | 63 |
| Figura 7. Correlaciones entre la variación en el crecimiento de <i>P. affinis</i> (Spreng.) en el sitio DAG y las anomalías en la precipitación, la temperatura e índice de sequía (SPEI).....  | 66 |
| Figura 8. Correlaciones entre la anomalía del ancho de anillo de <i>P. affinis</i> (Spreng.) en el sitio LBU y las anomalías en la precipitación, la temperatura e índice de sequía (SPEI).....   | 67 |
| Figura 9. Correlaciones entre la anomalía del ancho de anillo de <i>P. nigra</i> (Griseb) Hieron. en el sitio DRQ y las anomalías en la precipitación, la temperatura e índice de sequía (SPEI).....  | 68 |
| Figura 10. Mapa del sureste de América del Sur mostrando la extensión espacial de la correlación entre las cronologías de ancho de anillo de <i>P. affinis</i> (Spreng.) (DAG, LBU) y <i>P. nigra</i> (Griseb) Hieron. (DRQ) con la precipitación, temperatura e índice de sequía (SPEI)..... | 69 |
| Figura 11. Correlaciones entre la variación en el crecimiento de <i>P. affinis</i> (Spreng.) en el sitio DAG y las anomalías en el índice ENOS, SAM y SOI.....  | 71 |
| Figura 12. Correlaciones entre la variación en el crecimiento de <i>P. affinis</i> (Spreng.) en el sitio LBU y las anomalías en el índice ENOS, SAM, SOI, SADA y Humedad del Suelo.....   | 72 |
| Figura 13. Correlaciones entre la variación en el crecimiento de <i>P. nigra</i> (Griseb) Hieron. en el sitio DRQ y las anomalías en el índice ENOS, SAM y SOI.....   | 73 |

## Índice de tablas

### **Capítulo 2: Crecimiento leñoso en *Prosopis L.* en relación a la hidrología en América del Sur: una revisión**

Tabla 1 (Anexo). Investigaciones incluidas en la revisión.....46

### **Capítulo 3: Anillos de crecimiento anual en *Prosopis L.* y su relación con el clima en el litoral del Río Uruguay.**

Tabla 1. Descripción de los sitios de estudio en el litoral oeste de Uruguay.....55

Tabla 2. Datos de las cronologías de ancho de anillo.....62

Tabla 3. Datos de las cronologías de ancho de anillo utilizadas para comparación con clima.....64

Tabla 4. Resumen de las correlaciones entre la variación en el crecimiento de *Prosopis L.* y las anomalías en las variables climáticas.....74

Tabla 5 (Anexo). Anomalías observadas en las cronologías de ancho de anillo (anomalía >1, -1).....91



*Prosopis nigra* creciendo en uno de los sitios de estudio en el Departamento de Paysandú, Uruguay (crédito de foto C. Lucas).

## **Capítulo 1**

### **Introducción general**



## 1. Introducción

Los bosques, ecosistemas donde la vegetación dominante la constituyen los árboles, cubren el 30% de la superficie terrestre (Carlowicz et al. 2012; FAO 2020) y conforman el 50% de la biomasa vegetal total (Carlowicz et al. 2012). Los árboles son encontrados en 257 familias botánicas y existen más de 58.497 especies en el mundo (FAO 2020; Beech et al. 2021; BCGI 2021). A excepción de las regiones polares extremas y en las altitudes terrestres más altas, los árboles pueden encontrarse en ecosistemas de todo el mundo (BCGI 2021) adaptándose de forma novedosa a múltiples ambientes. Existen aproximadamente 3.041 trillones de árboles en el mundo (Crowther et al. 2015), y se han constatado árboles gimnospermos vivos de hasta 5067 años y angiospermos de más de 2000 años (Patrut et al. 2018; Munné-Bosch 2018).

El crecimiento de los árboles no suele ser un proceso continuo, sino que se detiene y acelera en el transcurso de un año y de la vida del árbol, quedando esta información registrada en el tronco de gran número de especies que forman anillos de crecimiento (Worbes 1995). Estos se observan como bandas concéntricas diferenciadas, visibles en las secciones transversales de los tallos con crecimiento secundario, formándose por un cambio en el tamaño, espesor y coloración de la pared de las células del xilema, en respuesta a cambios en las condiciones del ambiente y también a condicionantes genéticas (Kaennel & Schweingruber 1995).

Algunos de los factores externos más importantes que afectan el crecimiento son la disponibilidad de agua, la temperatura, la luz, el dióxido de carbono, el oxígeno y los minerales en el suelo (Fritts 1976); sin embargo todo factor que afecte el proceso de crecimiento, cómo el número de días nublados, la humedad relativa y la fuerza del viento puede quedar registrado en los anillos si representa una limitación para el crecimiento (Speer 2010).

La dendrocronología es la ciencia que se encarga del estudio y la datación de los anillos de crecimiento en los árboles leñosos (Fritts 1976). La palabra dendrocronología tiene su origen en el griego “dendron” que significa árbol y “kronos” que significa tiempo (Speer 2010). Esta ciencia examina los eventos que han sido registrados a través del tiempo en los anillos de crecimiento y pueden ser datados (Fritts 1976). El árbol se conforma como un instrumento de monitoreo ambiental, proveyendo un bioindicador de largo plazo tan extenso como la vida del árbol (Speer 2010).

La precipitación y temperatura suelen ser los factores que mejor explican la variación anual e interanual en el crecimiento de los árboles (Boninsegna et al. 2009). La secuencia anual de condiciones climáticas favorables y desfavorables (años húmedos y secos o cálidos y fríos) provocan la formación de anillos anchos y angostos, información que puede analizarse para reconstruir variaciones anuales en el clima ocurridas previo al intervalo registrado por mediciones directas, extendiendo el registro y mejorando las estadísticas existentes (Fritts 1976). Estas mejoras pueden ayudar a anticipar posibles futuros cambios climáticos y entender los ocurridos en el pasado (Gates & Mintz 1975), evaluar el clima histórico y producir predicciones climáticas futuras (Speer 2010).



Dada la correlación encontrada entre el crecimiento y las condiciones climáticas anuales, la dendrocronología se ha abocado al estudio de la variabilidad climática y se ha consagrado como una herramienta paleoclimática poderosa para registrar eventos recientes (Holoceno), habiéndose logrado reconstruir los cambios temporales de la temperatura y precipitación, con resolución anual, por los últimos 12.500 años (Hughes 2002). Muchos registros de datos proxy (fuentes alternativas de información de fenómenos naturales) climáticos y ambientales existen, como el polen, los núcleos de hielo y sedimentos de lagos, capas de coral y espeleotemas, pero la dendrocronología provee la fuente más confiable de datación con la mayor precisión entre estos proxys (Speer 2010). El ancho de los anillos de crecimiento, es el rasgo anatómico tradicionalmente usado en dendrocronología para el estudio de la dinámica de los bosques, fechar procesos geodinámicos o reconstruir variaciones climáticas ocurridas en el pasado (Fritts 1976; Schweingruber 1996; Giantomasi 2009).

La dendrocronología ha proveído valiosa información para develar numerosas interrogantes a lo largo de la historia. Los anillos de crecimiento fueron usados para comprender eventos atmosféricos raros, como el evento Tunguska en 1908, donde una explosión atribuida a la ráfaga de aire de un meteorito aplanó más de 80 millones de árboles en Rusia (Vaganov et al. 2004). También se usaron anillos de crecimiento para datar el famoso violín “Mesías” y comprobar que había sido creado por el famoso luthier Stradivari en 1687 (Grissino-Mayer et al. 2004). Se pueden obtener cronologías de anillos de crecimiento que se extienden hasta 10.000 años atrás (Pilcher et al. 1984; Ferguson et al. 1985; Becker 1993; Friedrich et al. 2004) y cronologías usando madera petrificada que aportan información sobre la variabilidad climática ocurrida millones de años atrás (Chaloner & Creber 1973; Falcon-Lang 1999).

A pesar de que la dendrocronología representa una poderosa herramienta para el entendimiento de la variabilidad ambiental y climática, el Banco Internacional de Datos de Anillos de Árboles (International Tree-ring Data Bank (ITRDB)), donde se encuentran muchas de las cronologías en árboles realizadas en el mundo, muestra un gran sesgo en su información, debido principalmente al predominio de estudios usando especies gimnospermas en el hemisferio norte, con aproximadamente el 75% de los datos perteneciendo a América del Norte y Europa (Zaho et al. 2018). Esto se debe en parte, a la creencia de que dada la baja estacionalidad climática en regiones tropicales y subtropicales, donde abundan las especies angiospermas, no se formarían anillos de crecimiento claros y datables, a diferencia de climas templados con marcada estacionalidad y abundancia de especies gimnospermas con una estructura leñosa más simple (Fritts 1976; Schweingruber 1988; Stahle 1999; Speer 2010).

Sin embargo, en las últimas décadas se ha logrado desarrollar cronologías certeras en estas regiones, ayudando a comprender el funcionamiento de ecosistemas boscosos tropicales, subtropicales y áridos, en África, Asia, Oceanía y América del Sur, aportando datos esenciales para comprender mecanismos y procesos globales (Zaho et al. 2018).

En América del Sur, se han realizado más de 300 cronologías de ancho de anillo, la mayoría de ellas en la región sur de la cordillera de los Andes, en las regiones áridas de Argentina, Chile, Perú y Bolivia y en regiones subtropicales con estacionalidad marcada (Boninsegna et al. 2009). Una de las primeras cronologías desarrolladas en el continente fue realizada usando una especie angiosperma (*Prosopis caldenia* Burkart) en 1931, mostrando la correlación de su crecimiento con las precipitaciones (Krebs & Fischer 1931). Desde entonces se han obtenido cronologías de árboles en sabanas arboladas de

elevaciones altas (Villalba & Boninsegna 1989; Morales et al. 2004; Giantomasi et al. 2009), en las Yungas montañosas húmedas (Grau et al. 2003), en el Chaco y el Cerrado (Ferrero and Villalba 2009; López & Villalba 2016) y en las llanuras aluviales de la Cuenca Amazonas (Schöngart et al. 2004; Schöngart et al. 2005), proveyendo información invaluable sobre la variabilidad histórica ambiental y su efecto en el crecimiento de los árboles en esta región.

Por otro lado, los datos dendrocronológicos en las llanuras tropicales y subtropicales son limitados, incluyendo la Cuenca del Amazonas y el bioma Pampa (Boninsegna et al. 2009), pero han resultado valiosos a la hora de evaluar la variabilidad hidrológica (Bogino & Jobbágy 2011; Lucas et al. 2018), mostrando correlación principalmente con el régimen de precipitaciones. Dado el aumento en las lluvias observado en América del Sur desde la década de 1970 (Barros et al. 2008; Varuolo et al. 2021; Llano & Vargas 2021) y la tendencia a que esta situación continúe frente a futuros escenarios de cambio climático (IPCC 2021), entender cómo la variabilidad en las precipitaciones puede afectar la productividad y el crecimiento de los árboles representa una prioridad en la región (Lucas et al. 2017).

Uruguay al no poseer una estacionalidad en cuanto a las lluvias bien diferenciada (Mendina & Pisciotto 2002; Panario 2014, Barreiro et al. 2019) y al no tener especies leñosas gimnospermas nativas, se ha visto rezagado en el desarrollo de la dendrocronología. Hasta la fecha se han realizado en el país cinco investigaciones utilizando anillos de crecimiento en árboles (Profumo 2010, Martino 2012), tres de ellas incluyendo cronologías (Piaz 2020) y sólo dos analizando una especie nativa, *Scutia buxifolia* Reiss. (Ferreira 2016, Lucas 2018). Si bien en nuestro Uruguay la precipitación no presenta una estacionalidad marcada, la evapotranspiración durante el verano es alta (Barreiro et al. 2019), pudiendo presentar las plantas un patrón de crecimiento estacional afectado principalmente por la disponibilidad de agua, como se observa en otras regiones climáticamente similares (Karlin & Diaz 1984; Giantomasi 2009).

En Uruguay, el cambio climático y su posible impacto en el bosque se encuentra poco estudiado, así como el potencial adaptativo del mismo (MGAP et al. 2018), la obtención de nuevas cronologías de ancho de anillo podría contribuir a un mayor entendimiento de la variabilidad climática histórica y la respuesta del bosque frente a la misma. La superficie cubierta por bosque nativo en nuestro país representa el 5% del territorio nacional (MGAP et al. 2018), con distintos tipos de bosque que presentan adaptaciones particulares a los tipos de suelo y las condiciones hidrológicas donde se desarrollan (Grela 2004; Haretche et al. 2012; Brazeiro 2017). Estas características otorgan la oportunidad de analizar distintos factores que limitan el crecimiento de los árboles y obtener datos proxys que describan esta relación.

Las sabanas arboladas de planicie uruguayas (bosques parque) son formaciones con gran influencia de la flora Chaqueña (Chebataroff 1942; Grela 2004; Haretche et al 2012 & Brazeiro 2018), con características similares a los bosques áridos y semiáridos en otras regiones de América del Sur donde numerosas cronologías de ancho de anillo han sido obtenidas utilizando el género *Prosopis* L. (Villalba 1985, Villagra & Roig 1997, López et al. 2005, Holmgren et al. 2006, Bogino & Jobbágy 2011, Decuyper et al. 2016, Ancajima 2017, Salazar et al. 2018; Carvalho et al. 2019). Este tipo de bosque se desarrolla en el litoral oeste de Uruguay, como formaciones boscosas abiertas con baja densidad de

individuos, compuestas por especies xerófilas creciendo en una matriz herbácea (Brussa & Grela 2007; Haretche et al. 2012; Brazeiro et al. 2017; Bentancourt 2021), donde el Ñandubay (*Prosopis affinis* Spreng.) y el Algarrobo (*Prosopis nigra* (Griseb) Hieron.) son especies características (Brussa & Grela 2007; Haretche et al. 2012; MGAP et al. 2018).

Estos bosques de carácter relictual, han sufrido un gran deterioro debido al avance de la agricultura y la ganadería, al desarrollarse en suelos de alto potencial productivo y a la facilidad para modificar estos ambientes abiertos (Achkar et al. 2015; Brazeiro et al. 2017; MGAP et al. 2018; Brazeiro et al. 2020). Las sabanas arboladas son en mayor parte secundarios, debido a los intensos eventos de corta ocurridos en el pasado con diferentes propósitos (Gautreau 2007), entre los que se encuentran la adquisición de leña y material de construcción. En los últimos años la corta ha disminuido, debido a la implementación de la Ley Forestal (N° 15.939), promulgada en 1987, la cual prohíbe la corta del bosque nativo con la excepción del uso doméstico o mediante autorización de la Dirección General Forestal, del Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca.

En Uruguay, los estudios comparativos entre el estado actual y el original de las formaciones vegetales son escasos (Grela & Brusa 2003), sin noción de la tendencia histórica de los mismos. Conocer cómo responden las sábanas arboladas de planicie a la variabilidad climática, representa beneficios productivos, al ser un ambiente muchas veces asociado a sistemas silvopastoriles, contribuyendo a la resiliencia de estos agrosistemas frente a eventos extremos (INIA 2022). En nuestro país, el registro nacional de las variables climáticas en el interior es escaso previo a 1979 (INUMET), por lo que la obtención de datos climáticos proxy puede enriquecer este registro y mejorar las predicciones estadísticas existentes.

La presencia de dos especies nativas del género *Prosopis* L.. dominantes en las sabanas arboladas, representan una oportunidad única para realizar estudios dendrocronológicos con un género con más de 55 cronologías de ancho de anillo realizadas en América del Sur (Cangiano 2020, Ambite et al. 2022) y compararlos con datos en otras regiones, aportando nueva información para Uruguay basada en nuevas especies.

## 1.2 Hipótesis y Objetivos

La hipótesis general de esta tesis plantea que las especies nativas del género *Prosopis* en Uruguay tienen potencial dendrocronológico como proxy del clima local y global.

El objetivo general de este trabajo es conocer la capacidad del género para realizar estudios dendrocronológicos en Uruguay. Con el fin de lograr este objetivo se plantea:

1. Una revisión de los estudios realizados con el género *Prosopis* en relación a parámetros hidrológicos en América del Sur, para familiarizarnos con la capacidad dendrocronológica del mismo (Capítulo 2).

2. Una investigación sobre la relación entre el crecimiento de especies nativas de *Prosopis* y la variabilidad climática local (precipitación, temperatura, sequía, humedad del suelo) y global (El Niño Oscilación Sur (ENOS), Modo Anular del Sur (SAM), Índice de Oscilación Sur (SOI)), en Uruguay (Capítulo 3).

## 2. Referencias

Achkar M., Brazeiro A. & Bartesaghi L., 2015. Evaluación de las principales presiones y amenazas a la biodiversidad de Uruguay. En: Brazeiro A. Ecorregiones de Uruguay. Biodiversidad, presiones y conservación. Aportes a la Estrategia Nacional de Biodiversidad. Facultad de Ciencias, CIEDUR, VS-Uruguay, SZU. Montevideo, 70-85.

Ambite S, Ferrero M.E., Piraino S., Badagian J., Muñoz A., Aguilera-Betti I., Gamazo P., Roig F. & Lucas C. 2022. *Prosopis* L. woody growth in relation to hydrology in South America: A review. Special Issue Advances in tropical and subtropical Dendrochronology in Central and South America in *Dendrochronologia* (aceptado).

<https://doi.org/10.1016/j.dendro.2022.126017>

Ancajima E.A., 2017. Dendrocronología de *Prosopis sp.* en la región Piura. Universidad de Piura, Facultad de Ciencias, Escuela Profesional de Ciencias Biológicas.  
<http://repositorio.unp.edu.pe/handle/UNP/1046>

Barreiro M., Arizmendi F. & Trinchin R. 2019. Variabilidad observada del clima en Uruguay. Proyecto “Fortalecer las capacidades de Uruguay para la adaptación al cambio climático en la zona costera”. Departamento de Ciencias de la Atmósfera Instituto de Física, Facultad de Ciencias.

Barros V.R., Doyle M.E. & Camilloni I.A. 2008. Precipitation trends in southeastern South America: relationship with ENSO phases and with low-level circulation. *Theoretical and Applied Climatology* 93: 19-33.

Becker B. & Kromer B. 1993. The continental tree-ring record—absolute chronology, 14C calibration and climatic change at 11 ka. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 103(1-2): 67-71.

Beech E., Rivers M.C., Oldfield S.F. & Smith P.P. 2021. GlobalTreeSearch download 1.5.  
<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.33593.90725>

Bentancourt A. 2021. Evaluación del riesgo de los principales ecosistemas boscosos de Uruguay. Universidad de la República, Facultad de Ciencias, Programa de Maestría en Ciencias Ambientales.

BGCI. 2021. State of the World’s Trees. BGCI, Richmond, UK.

Bogino S. & Jobbágy E., 2011. Climate and groundwater effects on the establishment, growth and death of *Prosopis caldenia* trees in the pampas (Argentina). *Forest Ecology Management* 262:1766–1774.  
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.07.032>

Boninsegna J.A., Argollo J., Aravena J.C., Barichivich J., Christie D., Ferrero M.E., Lara A., Le Quesne C., Luckman B.H., Masiokas M., Morales M., Oliveira J.M., Roig F., Srur A. & Villalba R. 2009.



Dendroclimatological reconstructions in South America: A review. *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology* 281: 210-228. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2009.07.020>

Brazeiro A. 2017. Seminario: Recientes avances en investigación para la gestión y conservación del bosque nativo en Uruguay. MGAP - Facultad de Ciencias, Montevideo.

Brazeiro A. 2018. Recientes avances en investigación para la gestión y conservación del bosque nativo de Uruguay. Facultad de Ciencias, MGAP, BMEL. Montevideo.

Brazeiro A., Bentancourt A. & Haretche F., 2020. Bosques nativos de Uruguay distribución, diversidad y propuesta de clasificación. *Plantae* 3, 18.

Cangiano M.L., Cendoya M.A., Risio-Allione L.V., Bogino S.M., 2020. Dendroecology of *Prosopis* species in the world: Secular traces of natural and anthropic events and their effects on *Prosopis* growth, Latin American Dendroecology. Springer, 121-140.

Carlowicz M. 2012. Seeing Forests for the Trees and the Carbon: Mapping the World's Forests in Three Dimensions: Feature Articles.

Carvalho N.J.F., Alves P.M. & Vieira A.J.R., 2019 The hydrological performance of *Prosopis juliflora* (Sw.) growth as an invasive alien tree species in the semiarid tropics of northeastern Brazil. *Biol Invasions* 21:2561. <https://doi.org/10.1007/s10530-019-01994-y>

Chaloner W. G. & Creber G. T. 1973. Growth rings in fossil woods as evidence of past climates. In *Implications of Continental Drift to the Earth Sciences* 1: 425-437.

Chebataroff J. 1973. Introducción de los ecosistemas de bañados salinos. *Revista Uruguaya de Geografía, Montevideo, Uruguay* 2: 31-41.

Crowther T.W., Glick H.B., Covey K.R. et al. 2015. Mapping tree density at a global scale. *Nature* 525: 201–205. <https://doi:10.1038/nature14967>

Decuyper M., Chavez R.O., Copini P. & Sass-Klaassen U., 2016. A multi-scale approach to assess the effect of groundwater extraction on *Prosopis tamarugo* in the Atacama Desert. *Journal of Arid Environments* 131:25-34. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2016.03.014>

Falcon-Lang H. J. 1999. The Early Carboniferous (Courseyan–Arundian) monsoonal climate of the British Isles: evidence from growth rings in fossil woods. *Geological Magazine*, 136(2): 177-187.

FAO & UNEP. 2020. The State of the World's Forests 2020. Forests, biodiversity and people. Rome. <https://doi.org/10.4060/ca8642en>

- Ferguson C. W., Lawn B. & Michael H. N. 1985. Prospects for the extension of the bristlecone pine chronology: radiocarbon analysis of H-84-1. *Meteoritics* 20.
- Ferreira A. 2016. Potencial de *Scutia buxifolia* para estudios dendrocronológicos en Uruguay. Facultad de Ciencias, Universidad de la República, Uruguay.
- Ferrero M.E. & Villalba, R. 2009. Potential of *Schinopsis lorentzii* for dendrochronological studies in subtropical dry Chaco forests of South America. *Trees* 23: 1275.
- Friedrich M., Remmele S., Kromer B. et al. 2004. The 12,460-year Hohenheim oak and pine tree-ring chronology from central Europe—a unique annual record for radiocarbon calibration and paleoenvironment reconstructions. *Radiocarbon*, 46(3): 1111-1122.
- Fritts H., 1976. *Tree rings and climate*. Academic, San Diego, California 567.
- Gates W. L. & Mintz Y. 1975. *Understanding Climatic Change: A Program for Action*. Report of the Panel on Climatic Variation of the US Committee for CARP (Global Atmosphere Research Project), National Research Council, National Academy of Sciences, Washington, D.C.
- Gautreau P., 2007. *Relatos de crisis ambiental en el Río de la Plata. Una evaluación geográfica de 300 años de relatos de “destrucción” de los bosques uruguayos (siglos XVIII al XX)*. Tesis de Doctorado. Université des Sciences et Technologies de Lille - U.F.R. de Géographie - Laboratoire TERRITOIRES, Villes, Environnements et Sociétés
- Giantomasi, M.A., Junent, F.A.R., Villagra, P.E., Srur, A.M., 2009. Annual variation and influence of climate on the ring width and wood hydrosystem of *Prosopis flexuosa* DC trees using image analysis. *Trees* 23: 117-126
- Grela I. 2004. *Geografía florística de las especies arbóreas de Uruguay: Propuesta para la delimitación de dendrofloras*. Tesis de Maestría en Ciencias Biológicas, PEDECIBA, Montevideo, Uruguay 97.
- Grela I. & Brussa C. 2003. Relevamiento florístico y análisis comparativo de comunidades arbóreas De Sierra De Ríos (Cerro Largo- Uruguay). *Agrociencia Uruguay* 7(2): 11-26.
- Grissino-Mayer H. D., Sheppard P. R. & Cleaveland M. K. 2004. A dendroarchaeological re-examination of the “Messiah” violin and other instruments attributed to Antonio Stradivari. *Journal of Archaeological Science*, 31(2): 167-174.
- Grau H.R., Easdale T.A., Paolini L. 2003. Subtropical dendroecology—dating disturbances and forest dynamics in northwestern Argentina montane ecosystems. *Forest Ecology and Management* 177: 131-143.
- Haretche F., Mai P. & Brazeiro A. 2012. Woody flora of Uruguay: inventory and implication within the

Pampean region. *Acta Botanica Brasilica* 26, 537-552.

Holmgren M., López B.C., Gutierrez J.R. & Squeo F.A., 2006. Herbivory and plant growth rate determine the success of El Niño Southern Oscillation-driven tree establishment in semiarid South America. *Global Change Biology* 12, 2263-2271.

Hughes M. K. 2002. Dendrochronology in climatology the state of the art. *Dendrochronología* 20: 95-116.

INIA. 2022. Oportunidades y desafíos del uso de los bosques nativos integrados a la producción ganadera de Uruguay. Serie Técnica N° 261, Montevideo.

IPCC .2021. Summary of Policymakers. Allan R. P., Hawkins E., Bellouin N. & Collins, B.

Kaennel M. & Schweingruber F. H. 1995. Multilingual glossary of dendrochronology. WSL FNP, Haupt, 133: 162-184.

Krebs C.& Fischer G. 1931. El pluviómetro secular, Circular de la Sección de Propaganda e Informes del Ministerio de Agricultura 847, República Argentina 1–24.

Llano M. P. & Vargas W. 2021. Spatial and temporal variability of daily precipitation concentration in southeastern South America. *International Journal of Climatology* 41: 1152-1163.

López B.C., Sabaté S., Gracia C.A. & Rodríguez R., 2005. Wood anatomy, description of annual rings, and responses to ENSO events of *Prosopis pallida* H.B.K., a wide-spread woody plant of arid and semi-arid lands of Latin America. *Journal of Arid Environments* 61:541–554.  
<https://doi.org/10.1016/j.Jaridenv.2004.10.008>

López L. & Villalba R. 2016. An assessment of *Schinopsis brasiliensis* Engler (Anacardiaceae) for dendroclimatological applications in the tropical Cerrado and Chaco forests, Bolivia. *Dendrochronologia* 40: 85-92.

Lucas C., Ceroni M., Baeza S., Muñoz A. & Brazeiro A. 2017. Sensitivity of subtropical forest and savanna productivity to climate variability in South America, Uruguay. *Journal of Vegetation Science* 28:192-205.

Lucas C., Puchi P., Profumo L., Ferreira A. & Muñoz A. 2018. Effect of climate on tree growth in the Pampa biome of Southeastern South America: First tree-ring chronologies from Uruguay. *Dendrochronologia* 52:113-122.

Martino L.A. 2012. La expansión de *Ligustrum lucidum* WT Aiton. En la cuenca media del Río Santa Lucía (Uruguay). Acción del clima en el reclutamiento. Facultad de Ciencias, Universidad de la República, Uruguay.

- Mendina M. & Pisciotano G. 2002. Cambios en la variabilidad espacial de la precipitación en Uruguay asociadas a “el niño” y aplicación a la mejora de pronósticos climáticos. Disertación en XII Congresso Brasileiro de Meteorologia, Foz de Iguacu-PR, 2002.
- MGAP, MVOTMA, UNIQUE, Hesen Forst. 2018. Estrategia Nacional de Bosque Nativo. Tradinco S.A.
- Morales M.S., Villalba R., Grau H.R. & Paolini L., 2004. Rainfall-controlled tree growth in high-elevation subtropical treelines. *Ecology* 85:3080–3089. <https://doi.org/10.1890/04-0139>
- Munné-Bosch S. 2018. Limits to tree growth and longevity. *Trends in Plant Science* 23 (11): 985-993. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2018.08.001>
- Panario D., Gutiérrez O., Bettucci L. S., Peel E., Oyhantçabal P. & Rabassa J. 2014. Ancient landscapes of Uruguay. In *Gondwana Landscapes in southern South America*. Springer Netherlands 161-199.
- Patrut A., Woodborne S., Patrut R.T. et al. 2018. The demise of the largest and oldest African baobabs. *Nature Plants* 4: 423-426. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2018.08.001>
- Piaz A. 2020. ¿Está incidiendo el cambio climático en las tasas de crecimiento de las plantaciones de *Pinus taeda* y *Pinus elliottii* en Uruguay?, Centro Universitario Regional Norte - Sede Tacuarembó, Ingeniería Forestal, Universidad de la República, Uruguay.
- Pilcher J. R., Baillie M. G., Schmidt B. & Becker B. 1984. A 7,272-year tree-ring chronology for western Europe. *Nature*, 312(5990): 150-152.
- Profumo L. 2010. Estudo de anéis de crescimento de espécies arbóreas de ambientes fluviais da bacia do rio Tacuarembó, Uruguai. Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias - Centro de Ciências Florestais e da Madeira, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal.
- Salazar P.C., Navarro-Cerrillo R.M., Ancajima E., Duque Lazo J., Rodríguez R., Ghezzi I. & Mabres A., 2018. Effect of climate and ENSO events on *Prosopis pallida* forests along a climatic gradient. *Forestry: An International Journal of Forest Research* 91(5):552–562. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpy014>
- Schöngart J., Junk W.J., Piedade M.T.F., Ayres J.M., Huttermann A. & Worbes M. 2004. Teleconnection between tree growth in the Amazonian floodplains and the El Niño-Southern Oscillation effect. *Global Change Biology* 10: 683-692.
- Schöngart J., Piedade M.T.F., Wittmann F., Junk W.J., Worbes M. 2005. Wood growth patterns of *Macrolobium acaciifolium* (Benth.) Benth. (Fabaceae) in Amazonian black-water and white-water floodplain forests. *Oecologia* 145: 454-461.

Schweingruber F. H. 1996. Tree rings and environment: dendroecology. Paul Haupt AG Bern.

Schweingruber F. H., Bartholin T., Schaur E. & Briffa, K. R. 1988. Radiodensitometric-dendroclimatological conifer chronologies from Lapland (Scandinavia) and the Alps (Switzerland). *Boreas* 17(4): 559-566.

Speer J.H., 2010. Fundamentals of Tree-ring Research. University of Arizona Press, Tucson.

Stahle D. W. 1999. Useful strategies for the development of tropical tree-ring chronologies. *Iawa Journal*, 20(3): 249-253.

Vaganov E.A., Hughes M.K., Silkin P.P, Nesvetalio V.D. 2004. The Tunguska Event in 1908: Evidence from Tree-Ring Anatomy. *Astrobiology* 4(3): 391-399. <https://doi.org/10.1089/1531107041939402>

Varuolo-Clarke A. M., Smerdon J. E., Williams A. P. & Seager R. 2021. Gross Discrepancies between Observed and Simulated Twentieth-to-Twenty-First-Century Precipitation Trends in Southeastern South America. *Journal of Climate*, 34(15): 6441-6457.

Villagra, P.E., Roig, F.A., 1997. Wood structure of *Prosopis alpataco* and *Prosopis argentina* growing under different edaphic conditions. *Iawa Journal* 18, 37-51.

Villalba R., 1985. Xylem Structure and Cambial Activity in *Prosopis flexuosa* DC. *IAWA Journal* 6, 119-130.

Villalba R. & Boninsegna J.A., 1989. Dendrochronological studies on *Prosopis flexuosa* DC. *IAWA Bulletin* 10(2):155–160. <https://doi.org/10.1163/22941932-90000483>

Worbes M. 1995. How to measure growth dynamics in tropical trees a review. *IAWA journal*, 16(4): 337-351.

Zhao S., Pederson N., D'Orangeville L. et al. 2019. The International Tree-Ring Data Bank (ITRDB) revisited: Data availability and global ecological representativity. *J Biogeogr.* 46:355–368. <https://doi.org/10.1111/jbi.13488>







Anillos de crecimiento identificables a simple vista en cortes transversales de *Prosopis affinis* (crédito de foto S. Ambite).

## Capítulo 2

### Crecimiento leñoso en *Prosopis* L. en relación a la hidrología en América del Sur: una revisión

\*Artículo científico aceptado [traducido al Español]: Serrana Ambite<sup>1</sup>, M. Eugenia Ferrero<sup>2,3</sup>, Sergio Piraino<sup>4</sup>, Juan Badagian<sup>5</sup>, Ariel A. Muñoz<sup>6,7,8</sup>, Isabella Aguilera-Betti<sup>6,9,10</sup>, Pablo Gamazo<sup>5</sup>, Fidel A. Roig<sup>3,11</sup>, Christine Lucas<sup>12</sup>. 2022. *Prosopis* L. woody growth in relation to hydrology in South America: A review, Special Issue *Advances in tropical and subtropical Dendrochronology in Central and South America* in *Dendrochronologia*. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2022.126017>

1 Maestría en PEDECIBA - Biología, Universidad de la República, Uruguay

2 Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales, CONICET-Universidad Nacional de Cuyo, Mendoza, Argentina

3 Laboratorio de Dendrocronología, Universidad Continental, Huancayo, Perú

4 Cátedra de Dasonomía, FCA-UNCuyo, Mendoza, Argentina.

5 Departamento del Agua, CENUR Litoral Norte - Universidad de la República, Salto, Uruguay

6 Laboratorio de Dendrocronología y Estudios Ambientales, Instituto de Geografía, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Valparaíso, Chile.

7 Centro de Acción Climática, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Valparaíso, Chile.

8 Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia CR2, Santiago, Chile

9 Programa de Doctorado en Ciencias Antárticas y Subantárticas, Universidad de Magallanes, Punta Arenas, Chile

10 Centro Transdisciplinario de Estudios Ambientales y Desarrollo Humano Sostenible (CEAM), Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile

11 Hémera Centro de Observación de la Tierra, Escuela de Ingeniería Forestal, Facultad de Ciencias, Universidad Mayor, Huechuraba, Santiago, Chile

12 Laboratorio Ecología Fluvial, Depto. De Ciencias Biológicas, CENUR Litoral Norte - Universidad de la República, Uruguay



## Resumen

Las especies arbóreas del género *Prosopis* L. han jugado un importante rol en el desarrollo de la investigación en anillos de crecimiento en eco-regiones áridas y semiáridas de América del Sur. Dada la distribución de *Prosopis* a lo largo de un amplio gradiente de precipitación de 0-2000 mm año<sup>-1</sup> y la característica freatófita presente en muchas especies del género, la relación entre su crecimiento y la disponibilidad de agua ha sido un tema recurrente durante el último siglo. Realizamos una revisión sistemática de la literatura que aborda a *Prosopis* en relación a diversos parámetros hidrológicos en América del Sur, combinando las coordenadas de los sitios de estudio con datos SIG de precipitación media anual (PMA), elevación, bioma y humedad del suelo de bases de datos en línea para comprender la distribución espacial de las investigaciones hasta la fecha. Recopilamos 40 publicaciones, abarcando el período desde 1931 hasta 2022, incluyendo resultados de 11 especies en cuatro países, relacionando su crecimiento con la precipitación, el nivel de la napa freática y la humedad del suelo, entre otros parámetros hidrológicos. La distribución espacial de los sitios de estudio abarca latitudes tropicales-subtropicales y templadas de 4° a 35°S. Los estudios cubrieron un amplio rango de elevaciones desde 30 hasta 3500 m.s.n.m., y PMA de 1 hasta 730 mm año<sup>-1</sup>. Los resultados obtenidos a partir de 32 estudios dendrocronológicos y ocho estudios no dendrocronológicos se agruparon en las subdisciplinas: formación de anillos de crecimiento y anatomía del hidrosistema, dendroclimatología, dendrohidrología y dendroecología. Esta revisión destaca las adaptaciones de *Prosopis* frente a condiciones áridas y la utilidad del estudio de los anillos de crecimiento en especies leñosas como indicadores de sequías históricas y variabilidad en los niveles de napas freáticas. Se enfatiza en la oportunidad de expandir el alcance geográfico-climatológico de la investigación del crecimiento de *Prosopis* a climas húmedos, así como para incorporar técnicas novedosas para el estudio de anillos de crecimiento como el uso de isótopos estables y cronologías de tamaño de vasos del xilema para comprender cómo este género registra la variabilidad en parámetros hidrológicos en toda América del Sur.

**Palabras clave:** *Prosopis*; anatomía de la madera; dendrocronología; dendroclimatología; dendrohidrología; dendroecología; anillos de crecimiento en árboles; América del Sur.



## 1. Introducción

El avance en la investigación de anillos de crecimiento en árboles en los trópicos y subtrópicos necesariamente implica el análisis de la madera de angiospermas. Este es el caso del género *Prosopis* L., el cuál ha jugado un importante rol en el desarrollo de la dendrocronología en latitudes tropicales y subtropicales de toda América durante casi un siglo (Krebs & Fischer 1931; Bogino 2014). Además de la posibilidad de datar sus anillos de crecimiento, la abundancia y distribución del género en regiones áridas y semiáridas ha facilitado el registro histórico de la variabilidad climática y eventos ambientales como incendios, brotes de insectos y cambios en los niveles de las napas freáticas. Una revisión global en 10 especies de *Prosopis* analizando más de 50 estudios, destaca las relaciones diferenciales entre crecimiento y clima acorde a la distancia de los recursos hídricos subterráneos y otras diferencias climáticas y geográficas regionales (Cangiano et al. 2020). Como ejemplo, Cangiano (2020) resalta la sensibilidad del crecimiento de *Prosopis* a la lluvia en regiones de gran altitud como los Andes, y la sensibilidad del crecimiento a la temperatura en elevaciones más bajas como en las Pampas, donde el acceso a la napa freática desempeña un papel clave. En las últimas dos décadas, las revisiones bibliográficas han resaltado la singularidad de *Prosopis* para desarrollar cronologías de relativamente largo plazo (>100 años) como proxies del paleoclima dentro de su rango de distribución (Villalba et al. 2000). En particular, se destacan sus adaptaciones morfológicas y fisiológicas frente al estrés hídrico, representando un valioso indicador de la disponibilidad de agua (Villagra et al. 2010). Dado el contexto actual de variabilidad de los recursos hídricos, las cronologías de anillos de crecimiento en *Prosopis* conforman una eficaz herramienta para evaluar y comparar tendencias hidroclimáticas históricas en América.

En América del Sur, el cambio climático y la gestión de los recursos hídricos representan temas de estudio focales. Dentro de su amplia gama climática y ecosistémica, la disponibilidad de agua media las tendencias espaciales de la biodiversidad (Alcaraz-Segura et al. 2013), la estructura forestal (Klein et al. 2015), la agricultura y la distribución de poblaciones humanas durante los últimos milenios (Morales et al. 2009). Como ejemplo de los grandes cambios hidro-climatológicos con implicaciones ecológicas y socioeconómicas, encontramos a la mega-sequía en Chile central (Garreaud et al. 2017; Garreaud et al. 2020), la sequía y deforestación en la cuenca del Amazonas (Nepstad et al. 2004; Staal et al. 2020), y los eventos de inundaciones extremas en el sureste de América del Sur (Cavalcanti et al. 2015). Estos fenómenos representan grandes desafíos para la gestión del agua en contexto de usos antrópicos del suelo y el cambio climático. Un creciente enfoque en los recursos de agua dulce y la relación entre los bosques y la hidrología ha dado lugar a estudios sobre los impulsores locales, regionales y globales de las precipitaciones y la disponibilidad de agua en diferentes regiones de América del Sur (Davidson et al. 2012; Jones et al. 2017; Álvarez-Garretón et al. 2019). Este continente abarca una diversidad de regiones hidroclimáticas, desde el desierto no polar más seco del mundo en la región de Atacama en el norte de Chile (Bull et al. 2018), hasta las selvas tropicales húmedas de la cuenca amazónica noroccidental (Coe et al. 2016). Sin embargo, escasos datos históricos sobre las variables hidroclimáticas limitan la información para comprender las tendencias a largo plazo en la disponibilidad de agua y la toma de decisiones sobre el uso del agua (Rice et al. 2009). Datos indirectos de variables hidrológicas han resultado valiosos a la hora de reconstruir la variabilidad histórica de las fuentes de

agua y del caudal en muchas cuencas de las Américas (Woodhouse & Lukas 2006; Margolis et al. 2011; Ferrero et al. 2015; Sauchyn et al. 2015; Muñoz et al. 2016; Fernández et al. 2018; Lucas et al. 2022).

Investigaciones en dendroclimatología y dendrohidrología han realizado contribuciones fundamentales a la comprensión de la variabilidad histórica en los índices de precipitación, caudal y sequía, usados como contexto para la planificación del manejo y la conservación de ambientes naturales a largo plazo (Barriá et al. 2019; Morales et al. 2020; Muñoz et al. 2020). Dado que la estacionalidad en trópicos y subtropicos depende principalmente del régimen de precipitaciones, la hidrología es un importante impulsor de los patrones de crecimiento y atributos anatómicos de los anillos de crecimiento en árboles. Las cronologías de ancho de anillo han sido utilizadas para reconstruir variaciones hidroclimáticas históricas y proporcionar evidencia de la frecuencia y severidad de las condiciones de sequía e inundaciones extremas durante siglos (Boninsegna et al. 2009; Ferrero et al. 2015; Humanes-Fuente et al. 2020). Promedios de descarga de ríos a largo plazo abarcando más de 100 años, reflejan los peligros para planificar la gestión del agua basada en series temporales relativamente limitadas (Fernández et al. 2018; Muñoz et al. 2020). Dada la influencia de la variabilidad hidrológica en el crecimiento de los anillos y la composición molecular de los fotosintatos que componen la madera, los datos obtenidos de isótopos de anillos en árboles han contribuido a entender cómo la sequía influye en el secuestro de carbono y en los mecanismos de eficiencia del uso de agua en árboles (Brienen et al. 2011). En ecosistemas tropicales y subtropicales, especies de angiospermas como las del género *Prosopis* (Villalba et al. 2000; Piraino et al. 2015; Piraino & Roig 2016) juegan un papel clave proporcionando datos indirectos sobre las variaciones anuales en la disponibilidad de agua.

Revisiones previas describen los avances de la dendrocronología usando a *Prosopis* en América del Sur, valorando a la investigación en anillos de crecimiento en árboles como proxy para la obtención de datos ecológicos y climáticos (Villalba et al. 2000; Villagra et al. 2010; Cangiano et al. 2020). Esta revisión proporciona un análisis de la capacidad dendrocronológica del género *Prosopis* centrándose en la relación entre su crecimiento y variables hidrológicas, mapeando la distribución espacial de estas investigaciones respecto a gradientes hidrológicos y topográficos.

## 1.2 Objetivos

1. Analizar la frecuencia y distribución espacial de investigaciones y cronologías que abordan el crecimiento de *Prosopis* en relación a la hidrología en América del Sur, respecto a su geografía, hidroclima, humedad del suelo, gradientes altitudinales y regiones climáticas Köppen.
2. Aportar al entendimiento de la relación entre el crecimiento de *Prosopis* y las variables hidrológicas a través de la recopilación de literatura en América del Sur.

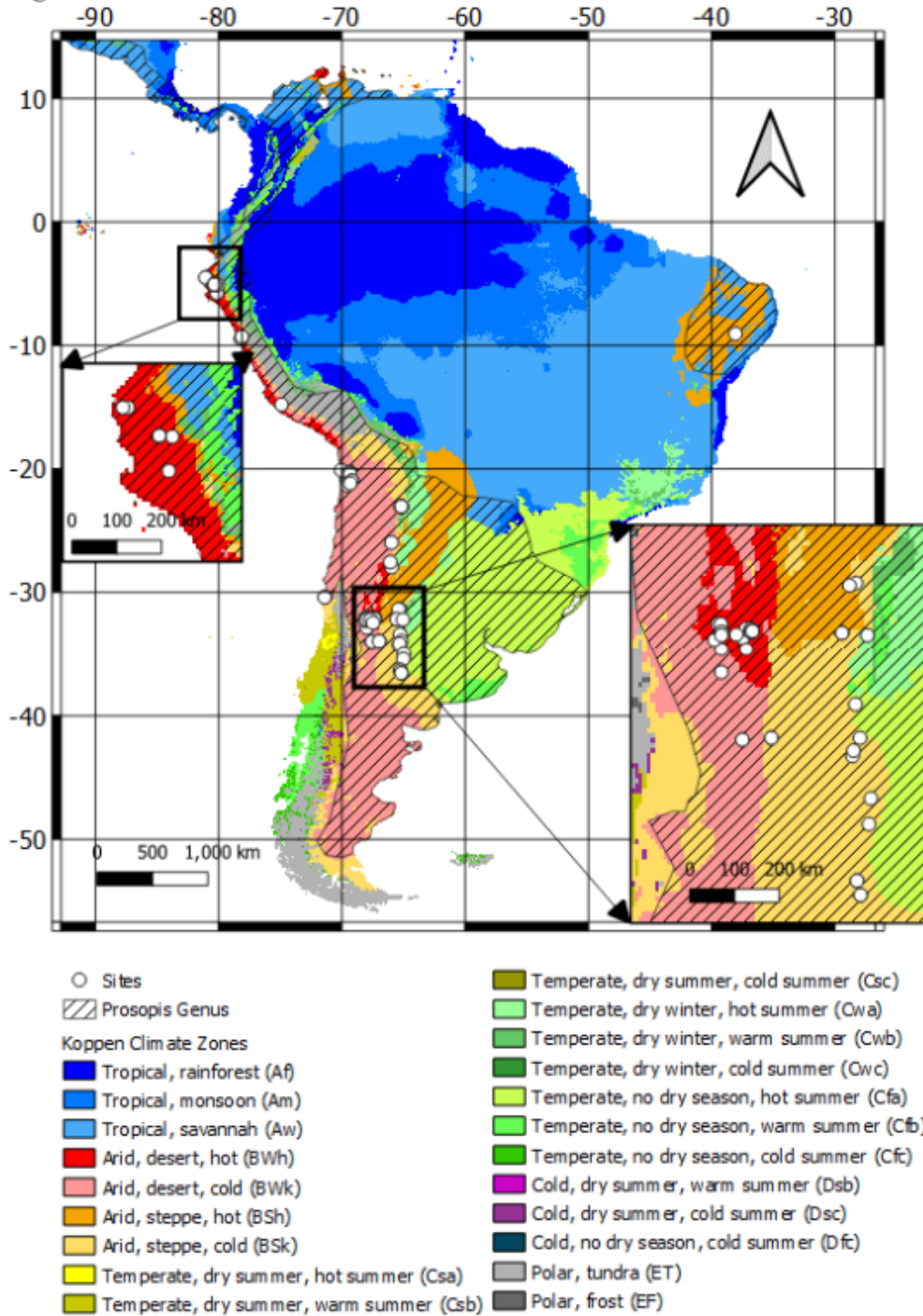
## 2. Materiales y métodos

### 2.1. Género *Prosopis* L.

*Prosopis* L. es un género que pertenece a la familia Fabaceae, con 44 especies que se distribuyen en zonas áridas y semiáridas (Burkart 1976; Pasiecznik et al. 2004) del sudeste de Asia (3 especies nativas), de África tropical (1 especie nativa) y América, desde el suroeste de Estados Unidos hasta la Patagonia en Chile y Argentina (40 especies nativas), con 31 especies exclusivas de América del Sur (Burkart 1976). El género se encuentra en 129 países del mundo y presenta especies exóticas invasoras en 112 países (Shackleton et al. 2014). Además, dentro del género se registran especies que forman híbridos con rasgos intermedios (Pasiecznik et al. 2004). Las especies arbóreas se distribuyen en climas áridos y semiáridos de Argentina, el norte y centro de Chile, el sur de Bolivia y el oeste de Paraguay, y a lo largo de climas húmedos subtropicales del sureste de América del Sur como Uruguay, el noroeste de Argentina, el sur de Brasil y el este de Paraguay. Encontramos también especies de *Prosopis* en ambientes semiáridos de gran altitud en zonas tropicales de Perú, Ecuador, Colombia y Venezuela (Pasiecznik et al. 2004). Especies arbustivas del género pueden encontrarse en climas templados al sur de Argentina, como *Prosopis denudans* Benth. y *Prosopis alpataco* Phil., llegando a las provincias sureñas de Chubut y Santa Cruz en la Patagonia (Fig. 1) . La capacidad de muchas especies del género para tolerar la sequía, la salinidad y la alcalinidad, sumada a la impresionante extensión de su sistema radicular, que puede alcanzar 30 m horizontales y 17 m verticales (Villagra et al. 2010) en especies freatofitas, lo convierten un género dominante en la flora leñosa de estas áreas, principalmente dentro de las latitudes tropicales y subtropicales (35°N-35°S) de las Américas (Roig 1993; Villalba et al. 2000).



Fig. 1



**Figura 1.** Mapa de la distribución de los 40 sitios de estudio revisados para *Prosopis* L. en América del Sur, sobre regiones climáticas de Köppen. Los estudios se realizaron sobre el desierto árido, cálido (BWh); desierto árido, frío (BWk); estepa árida, calurosa (BSh); estepa árida, fría (BSk); templado, invierno seco, verano caluroso (Cwa); templado, sin estación seca, verano caluroso (Cfa). El polígono discontinuo muestra la distribución actual aproximada de las especies arbóreas, sensu Pasiecznik et al. 2004, extendida hacia el sur de Argentina con el fin de incluir las especies arbustivas, sensu Palacios & Brizuela 2005, del género *Prosopis* en América del Sur.

## 2.2. Revisión de la literatura y metanálisis

Se obtuvieron más de 97 artículos publicados sobre *Prosopis*, de los cuales 57 fueron descartados por no mencionar variables hidrológicas. Fué compilada una base de datos con los 40 artículos restantes, con datos del país, provincia o estado, sitio de estudio, latitud, longitud, altitud (m.s.n.m.), precipitación anual, especie de estudio, año de publicación, autores y enfoque del estudio; los artículos fueron georeferenciados acorde a las coordenadas geográficas proporcionadas, en los casos donde las mismas no fueron explicitadas se localizó la ubicación aproximada del área de estudio en Google Earth (Fig. 1). Fueron utilizados como unidad de análisis los estudios y las cronologías cuando disponibles, dado que algunas publicaciones incluían múltiples cronologías y otras ninguna (Anexo: Tabla 1). A cada estudio se le asignó un “enfoque” en una de cuatro categorías: anatomía de la madera, dendroclimatología, dendrohidrología y dendroecología, según los objetivos definidos en cada trabajo.

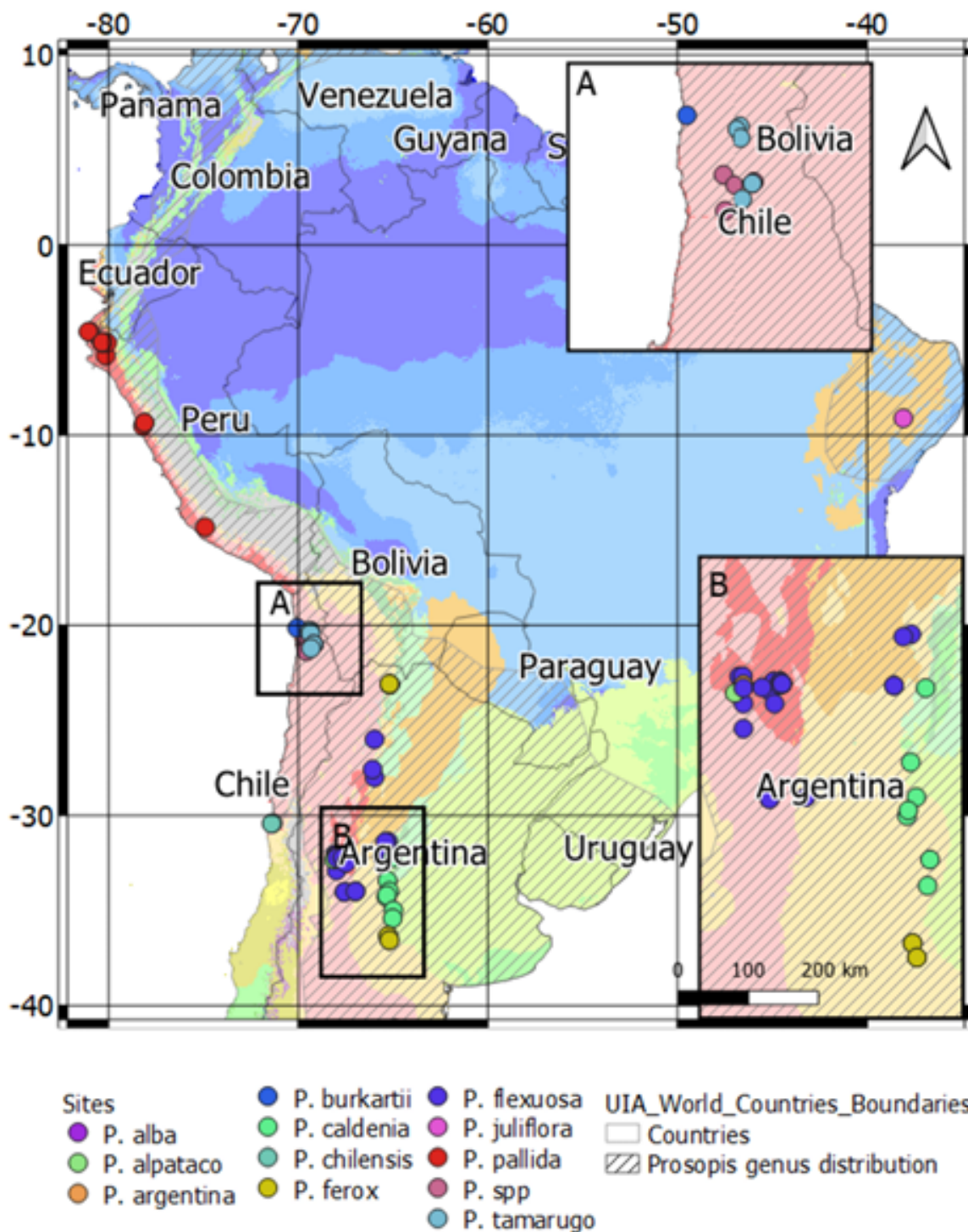
La ubicación de cada cronología se mapeó en QGIS v. 3.14 (GIS Development Team 2020). Con el fin de analizar la distribución de estas cronologías, obtuvimos una red global de ríos y cuencas hidrográficas de WWF HYDROSheds (Lehner & Grill 2013). Los datos grillados para la precipitación media anual (PMA) de 1970 a 2020 sobre América del Sur se calcularon a partir de series temporales mensuales obtenidos de la Unidad de Investigación Climática (Universidad de East Anglia) CRU TS 4.05 y Met Office (Harris et al. 2020) con una resolución espacial de 0,5°. De manera similar, la humedad media anual del suelo de 0-10 cm de profundidad entre 1982 y 2020 en América del Sur se calculó utilizando la serie temporal grillada para la humedad mensual del suelo de FLDAS (McNally 2018) con una resolución espacial de 0,1°. La PMA y la humedad media anual del suelo de cada sitio de estudio se muestra en la Tabla 1 (Anexo), obtenida del punto de cuadrícula más cercano a cada sitio en cada base de datos. La elevación se obtuvo a partir de la intersección de los puntos de los sitios de estudio con un Mapa Digital de Elevación para América del Sur a una resolución espacial de 0,018° de longitud y 0,015° de latitud. Utilizamos el paquete Xarray (Hoyer & Hamman 2017) en el lenguaje Python 3.8 (Van Rossum & Drake 2009) para mapear las ubicaciones de los sitios de estudio a través de gradientes de elevación, PMA y humedad media anual del suelo. Los archivos SIG para las zonas climáticas de Köppen (Fig. 1) se descargaron de <http://www.gloh2o.org/koppen/>. Para evaluar la distribución espacial de las investigaciones desarrollamos histogramas para la frecuencia de sitios relacionados con la precipitación anual media (PMA), la elevación (m.s.n.m.) y la humedad del suelo.

## 3. Resultados y discusión

Fué revisada la literatura sobre la relación entre *Prosopis* y la hidrología en América del Sur. Los 40 artículos seleccionados abarcan 11 especies del género en seis zonas climáticas de Köppen (Fig. 1) y cuatro países (Fig. 2), incluyendo 56 cronologías de ancho de anillo y 27 sitios con otro tipo de análisis (isotópicos, potencial hídrico, crecimiento, anatomía, etc.). Dada la existencia de varias cronologías por artículo de investigación, utilizamos el sitio (n = 83) como unidad de análisis para explorar los patrones espaciales de investigación hasta la fecha. Los sitios abarcan las latitudes 4,5° S a 35,4° S, comprendiendo en su mayoría latitudes tropicales y subtropicales (Fig. 1). No obstante, se observó una falta de investigaciones publicadas en la Patagonia sur de Argentina, donde *Prosopis* está

presente como especie arbustiva, así como en el noroeste de América del Sur, en Ecuador, Colombia y Venezuela, donde el género se distribuye en elevaciones altas (Figs. 1, 3). Los sitios de estudio abarcaron un gradiente de precipitaciones de 1 a 730 mm año-1, acorde a los datos informados por las investigaciones, con una distribución uniforme de sitios a través del mapa de PMA (Fig. 3A). Se registró un estudio realizado con *Prosopis burkartii* Muñoz en el norte de Chile, donde la precipitación media anual fue de 1 mm año-1 (Fig. 2), mientras que se denotó una falta de investigaciones publicadas en regiones subhúmedas y húmedas donde *Prosopis* ocurre, con precipitaciones de 731 a más de 1500 mm año-1, y donde la humedad del suelo es superior a 0,22 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>, como en el sureste de América del Sur (Fig. 3A, 3B). Estas regiones son climáticamente diferentes de las regiones desérticas, estepas áridas y semiáridas donde la investigación con *Prosopis* fue más frecuente. Los estudios abarcaron un amplio gradiente altitudinal entre 30 y 3500 m.s.n.m. (Figs. 4, 5), con 65% de los sitios ocurriendo entre 200 y 600 m. Los sitios de gran altitud por encima de los 2800 m fueron exclusivamente usando *Prosopis ferox* Griseb. en los valles intermontanos del norte argentino (Fig. 2; Anexo: Tabla 1). Los estudios en altitudes bajas se basaron exclusivamente en *Prosopis pallida* (Humb. & Bonpl.) Kunth y en las relaciones crecimiento-clima en ambientes áridos de la costa peruana (Figs. 2, 4). La investigación abarcó 11 especies de *Prosopis* (Fig. 2), siendo las dominantes acorde al número de sitios de estudio *Prosopis flexuosa* DC. (43 %), *P. pallida* (14 %), *P. ferox* (10 %) y *Prosopis caldenia* Burkart (10 %) (Figura 2). La revisión comienza con un resumen sobre la formación de anillos de crecimiento en árboles y la anatomía de las especies de *Prosopis*, como base para comprender su relación única y compleja con la hidrología.

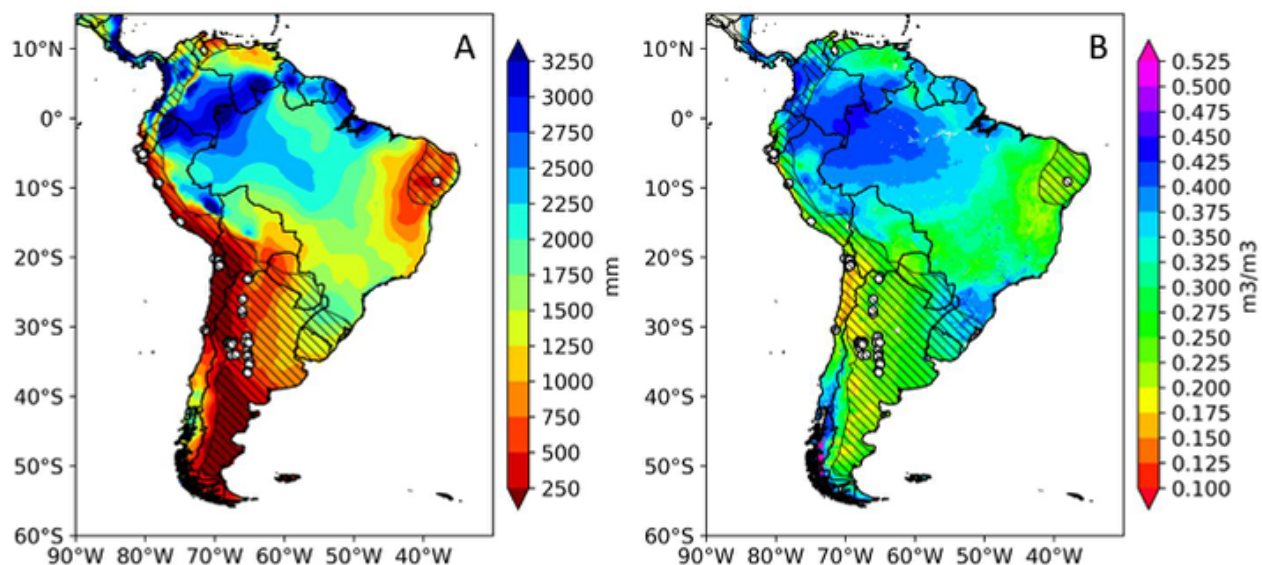
Fig. 2



**Figura 2.** Mapa de la distribución de los 83 sitios de estudio denotando la especie de *Prosopis* utilizada (las ubicaciones asociadas con más de una especie se indican como *Prosopis spp.*), mostrando las regiones climáticas del país y de Köppen. El polígono discontinuo muestra la distribución actual aproximada de las especies arbóreas, sensu Pasiecznik et al. 2004, extendida hacia el sur de Argentina para incluir las especies arbustivas, sensu Palacios & Brizuela 2005, del género *Prosopis* en América del Sur.

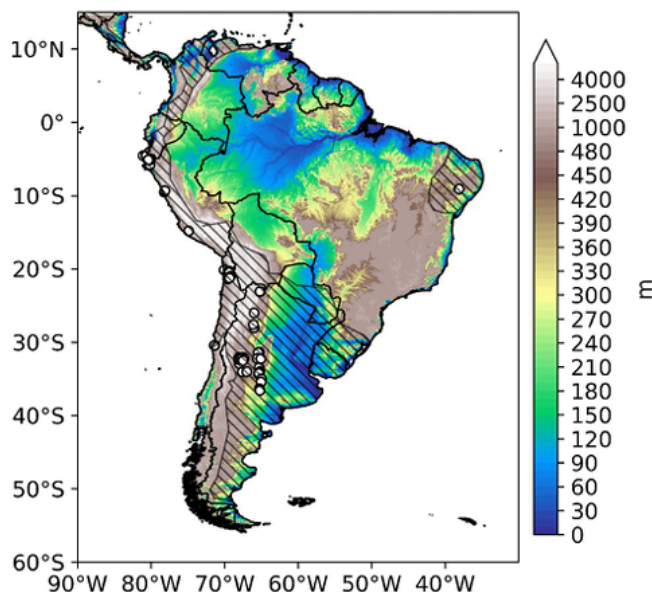


**Fig. 3**



**Figura 3.** Mapa de la ubicación de los sitios de estudio por A) Precipitación media anual – PMA (mm) y B) Humedad del suelo media anual a 0-10 cm de profundidad (m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>). El polígono discontinuo muestra la distribución actual aproximada de las especies arbóreas, sensu Pasiecznik et al. 2004, extendida hacia el sur de Argentina para incluir las especies arbustivas, sensu Palacios & Brizuela 2005, del género *Prosopis* en América del Sur.

**Fig. 4**



**Figura 4.** Mapa de la ubicación de los sitios de estudio por Elevación (m.s.n.m.). El polígono discontinuo muestra la distribución actual aproximada de las especies arbóreas, sensu Pasiecznik et al. 2004, extendida hacia el sur de Argentina para incluir las especies arbustivas, sensu Palacios & Brizuela 2005, del género *Prosopis* en América del Sur.



red de células tubulares usadas para el transporte de agua (Eckstein 2004) – sugiere adaptaciones a precipitaciones limitadas y sequías prolongadas, con elementos de los vasos pequeños y cortos, placas de perforación simple y paredes gruesas, características que permiten una alta actividad metabólica durante períodos de lluvias cortas y poco frecuentes en zonas áridas (ver figuras de anatomía de anillos en Villalba et al. 2000). *P. flexuosa* presenta grandes vasos concentrados en la madera temprana, lo que permite un ajuste fisiológico a las grandes demandas de transporte de agua a través del xilema al inicio de la temporada de crecimiento, coincidiendo con las lluvias de noviembre a diciembre en el centro de Argentina (Villalba & Boninsegna 1989; Giantomasi et al. 2009).

La formación de anillos de crecimiento en *Prosopis* puede responder a cambios estacionales en la disponibilidad de agua, como se observa en regiones con precipitaciones estacionales concentradas durante la primavera y el verano austral, como en el centro-oeste de Argentina (Karlín & Díaz 1984; Piraino et al. 2015). Como ejemplo, la actividad cambial en *P. flexuosa* en Argentina presentó diferenciación en vasos en la madera temprana durante la primera semana de noviembre, coincidiendo con el inicio de la estación lluviosa. La actividad del cambium alcanzó su punto máximo durante diciembre y enero y cesó al finalizar el período lluvioso (abril), permaneciendo completamente inactivo durante la estación seca; una adaptación a las rigurosas condiciones ambientales donde crece esta especie (Villalba 1985). Fuera de este caso, los patrones mensuales y estacionales de actividad cambial y formación de anillos en climas sin estación seca (ver Fig. 1) son poco conocidos en América del Sur.

La variabilidad observada entre especies en la estructura celular del hidrosistema es indicativa de su estrategia de crecimiento y supervivencia en ambientes áridos y semiáridos con diferentes fuentes de agua y estacionalidad en las precipitaciones. En las especies *P. alpataco* y *Prosopis argentina* Burkart del centro-oeste argentino, la madera presenta porosidad semianular (Villagra & Roig 1997). *P. argentina* muestra una mayor variabilidad en el diámetro de los vasos comparado con *P. alpataco*, sugiriendo que se comporta como una especie xeromórfica, maximizando la resistencia al estrés hídrico en las dunas de arena donde crece sin acceso a aguas subterráneas (Villagra & Roig 1997). Alternativamente, *P. alpataco* presenta características mesomórficas, incluyendo un hidrosistema que prioriza la eficiencia en la conducción del agua, coincidiendo con ambientes moderadamente húmedos, donde tiende a crecer en áreas con acceso a aguas subterráneas y mínima dependencia de fuentes pluviales en regiones secas (Villagra & Roig 1997). Estas diferencias interespecíficas en la estructura del hidrosistema muestran que *Prosopis* es un género altamente plástico, adaptando las estrategias de crecimiento a diferentes condiciones ambientales, especialmente a la disponibilidad de agua. La accesibilidad al agua subterránea puede explicar la variabilidad inusual o inesperada en las tasas de crecimiento y la densidad leñosa del género, debido a su capacidad freática. En base a señales isotópicas y fluctuaciones en los niveles de agua subterránea en áreas interdunares de ecosistemas desérticos de Argentina, Jobbágy et al. (2011) determinaron que el agua freática era accesible para *P. flexuosa* a una profundidad de hasta 10 m, comportándose como una especie freática facultativa que también crece en dunas sin acceso a aguas subterráneas, mientras que *P. alpataco*, otra especie característica del desierto del Monte argentino, solo crece en zonas bajas interdunares, totalmente dependiente del acceso a aguas subterráneas como especie freatofita obligada (Jobbágy et al. 2011).

La arquitectura del hidrosistema en su conjunto, incluida la profundidad a la que llegan las raíces, también es indicativa de cómo el crecimiento de las especies de *Prosopis* está vinculado a los recursos hídricos en diferentes entornos. *P. flexuosa* crece en el centro-oeste de Argentina con una precipitación menor a 500 mm año<sup>-1</sup>, y accede a fuentes de agua tanto subterráneas como pluviales, a través de la estratificación horizontal (30 m) y vertical (17 m de profundidad) de su sistema radicular (Villagra et al. 2010), garantizando una fuente de agua más estable que la lluvia y permitiéndole crecer en suelos donde otras especies leñosas no pueden sobrevivir. *P. flexuosa* puede enraizar en suelos con diferentes características, mostrando una gran plasticidad fenotípica al crecer con acceso diferencial al nivel freático (Guevara et al. 2010).

### 3.2 Dendroclimatología

La alta durabilidad de la madera de *Prosopis* y resistencia a la intemperie, junto con su uso histórico en construcciones antiguas en sitios áridos, ha facilitado el desarrollo de cronologías de más de un siglo de extensión. Este es el caso de la madera de *P. caldenia* y *P. flexuosa*, utilizada para la construcción de pozos de agua hace más de 250 años en la Pampa argentina (Bogino et al. 2019). Del mismo modo, muestras de la madera de *Prosopis tamarugo* Phil. y *Prosopis alba* Griseb. de más de 2600 años fueron recuperadas en el sitio arqueológico “Las Ramaditas” en el desierto de Atacama en Chile (Rivera et al. 2010); mientras que muestras de *Prosopis sp.* de más de 2300 años se obtuvieron del observatorio astronómico arqueológico de Chankillo en el desierto costero de Perú (Ghezzi & Rodríguez 2015). De manera similar, ha sido posible estudiar el sistema climático del desierto de Atacama en el Holoceno, a través de datos anuales y subanuales de los valores de  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^{13}\text{C}$  obtenidos de anillos de crecimiento de árboles de *Prosopis sp.*, recolectados de depósitos superficiales y sitios arqueológicos en la cuenca de la Pampa del Tamarugal en el norte de Chile (Olson et al. 2020). El registro de árboles antiguos se comparó con registros modernos de árboles de *Prosopis*, mostrando que los registros de eventos húmedos y secos durante el Holoceno en la Pampa del Tamarugal son sub-decadales y probablemente regulados por la variabilidad de El Niño Oscilación del Sur (ENOS) (Olson et al. 2020). Para árboles vivos, se han encontrado individuos de *P. flexuosa* que alcanzan los 200 años de edad, mientras que árboles de *P. caldenia* superan los 300 años de edad (Villalba et al. 2000) e individuos de *P. ferox* pueden alcanzar los 500 años de edad (Morales et al. 2001). En estas investigaciones, *Prosopis* se presenta como un indicador clave de la variabilidad ambiental histórica en ecosistemas áridos y semiáridos de América del Sur.

La relación entre el ancho de anillos de crecimiento de *Prosopis* y las variables climáticas regionales, como la lluvia y la temperatura, varía entre regiones y sitios. Tanto la lluvia como la temperatura pueden mediar el crecimiento, ya que la temperatura -particularmente a principios de verano o temperaturas de estación seca en climas tropicales y subtropicales- influye en las tasas de evaporación y evapotranspiración, por lo tanto, influyendo en el estrés hídrico y la disponibilidad de agua en las condiciones típicamente áridas o semiáridas que abarca la distribución del género. (Morales et al. 2004; Morales & Villalba 2012; Salazar et al. 2018). La anatomía de la madera de *P. flexuosa* en relación a la variabilidad climática fué evaluada en las regiones fitogeográficas del Chaco y el Monte, en las provincias de Córdoba y Mendoza en Argentina (Villalba & Boninsegna 1989). Los resultados mostraron que temperaturas por debajo del promedio y lluvias por encima del promedio durante la



primavera (octubre-diciembre) favorecieron el crecimiento. En primavera, las lluvias antes y durante la temporada de crecimiento se correlacionaron positivamente con el crecimiento de los árboles, mientras que altas temperaturas primaverales durante la misma temporada redujeron el crecimiento anual.

*Prosopis juliflora* DC., una especie nativa de América del Norte introducida en la región semiárida del noreste de Brasil (Caatinga), también muestra una correlación entre los anillos de crecimiento y el clima, con anillos anchos relacionados a un aumento en las lluvias durante períodos secos; mostrando que esta especie es altamente sensible a la variabilidad de las precipitaciones (Nogueira et al. 2019).

Los estudios de la relación clima-crecimiento en *Prosopis* han contribuido a una comprensión más amplia de los factores limitantes en latitudes tropicales de gran altitud. En contraste con la investigación en climas montanos templados donde la temperatura es a menudo el factor limitante principal para el crecimiento, poblaciones de *P. ferox* en la Quebrada de Humahuaca (Argentina) a 3450 m.s.n.m., mostraron que la precipitación es quien limita el crecimiento (Morales et al. 2004). El estudio mostró una correlación positiva del crecimiento con temperaturas por debajo del promedio y precipitaciones por encima del promedio durante la temporada de crecimiento del año previo. La correlación del crecimiento anual con precipitaciones abundantes y altos niveles de humedad sugiere que el agua es el factor limitante principal para el crecimiento leñoso en latitudes subtropicales, incluso en altas elevaciones.

La sensibilidad del crecimiento de *Prosopis* a la precipitación local y la variabilidad en la temperatura también se encuentra ligada a fuerzas climáticas globales que influyen en el clima regional. En algunas regiones de América del Sur, los aumentos estacionales de las precipitaciones están asociados con la fase de El Niño del índice El Niño Oscilación del Sur (ENOS). El registro de eventos ENOS se evaluó en cronologías de anillos de crecimiento de *P. pallida*, una especie arbórea dominante en los bosques secos del norte de Perú (López et al. 2005). Las anomalías en el crecimiento anual se correlacionaron con la precipitación anual, donde los incrementos en el crecimiento coincidieron con años de abundantes precipitaciones durante eventos El Niño en 1983, 1987, 1992, 1998.

Otros estudios sobre la relación entre ENOS y el crecimiento de *P. pallida* sugieren que los árboles destinan recursos al crecimiento durante los eventos de El Niño (Ancajima More 2017) aumentando hasta 4 veces su tasa de crecimiento promedio durante años El Niño (Salazar et al. 2018). Estos resultados coinciden con estudios en la misma especie (Rodríguez et al. 2005) y demuestran que los eventos ENOS son detectables en los anillos de crecimiento de *P. pallida* y *Prosopis chilensis* (Molina Stuntz (Lopez et al. 2006), y probablemente también lo sean en otras especies en regiones con climas vinculados a fenómenos ENOS.

### 3.3 Dendrohidrología y agua subterránea

Un aspecto crítico de la gestión del agua en sistemas áridos, es la variabilidad interanual observada en el caudal de los ríos, *Prosopis* puede contribuir a la comprensión de esta variabilidad a través del análisis de sus anillos de crecimiento. Cronologías de *P. flexuosa* en bosques de galería en el desierto del Monte en el centro-oeste argentino, mostraron que el crecimiento de individuos cercanos al río tenía una correlación positiva con la variabilidad del caudal en primavera y verano, coincidiendo con la temporada de crecimiento, mientras que los individuos alejados del río presentaban una correlación positiva con las

descargas de invierno y primavera, que recargan las napas freáticas con las lluvias a finales de verano (Piraino & Roig 2016). De manera similar, el crecimiento de *P. flexuosa* estuvo fuertemente correlacionado con la lluvia en sitios con suelos permeables alejados de los ríos, y levemente correlacionado con la lluvia en sitios cercanos a los ríos, debido a la presencia de una fuente de agua estable (Piraino et al. 2015). La alta correlación entre el caudal y el crecimiento anual de individuos cercanos al río refleja el valor de *P. flexuosa*, y posiblemente de otras especies del género, para generar reconstrucciones de caudal.

La disponibilidad de agua, incluyendo las fuentes subterráneas, representa un factor limitante principal en el crecimiento de especies leñosas en climas áridos y semiáridos de América del Sur, las cronologías de anillos de árboles en ambientes xéricos pueden proporcionar un indicador de las fluctuaciones anuales en los niveles freáticos accesibles a las especies de freatofitas (Villagra et al. 2005a; Bogino & Jobbágy 2011). La accesibilidad al agua subterránea puede provocar efectos variables sobre la vegetación y enmascarar la correlación entre el crecimiento de los árboles y la precipitación y el caudal. En ecosistemas áridos del Chaco y el Monte, el crecimiento de los anillos de árboles con acceso al agua subterránea no estuvo relacionado con el clima, mientras que aquellos sin acceso a la napa se correlacionaron con la temperatura y la precipitación (Giantomasi et al. 2013). De manera similar, la heterogeneidad microtopográfica en los paisajes desérticos modula la frecuencia e intensidad del estrés hídrico experimentado por poblaciones de *P. flexuosa*, debido al acceso diferencial al agua subterránea (Giordano et al. 2011). La variación de los niveles freáticos también se encuentra asociada a cambios fenológicos en *Prosopis*, con niveles decrecientes incluso durante períodos de lluvia, mientras *Prosopis* alcanza su punto máximo de actividad metabólica, y niveles crecientes durante la caída de hojas y baja actividad metabólica al comienzo del invierno, a pesar de la falta estacional de lluvias (Jobbágy et al. 2011). El pastoreo en sistemas áridos y semiáridos también puede combinarse con otros factores para influir en los niveles de agua subterránea y, a su vez, en el crecimiento de los árboles. Análisis en poblaciones de *P. flexuosa* mostraron una disminución en los niveles de agua subterránea en áreas boscosas en comparación con niveles altos en áreas bajo pastoreo, debido a la menor cobertura de plantas freatofitas (Meglioli et al. 2021). Estudios isotópicos mostraron que el pastoreo afecta la química del agua subterránea, aumentando las concentraciones de cloruros, nitratos y sales (Meglioli et al. 2021), aumentando la salinidad del suelo y comprometiendo el establecimiento y crecimiento de la vegetación. Resultados similares se encontraron en poblaciones de *P. caldenia* en la provincia de San Luis, Argentina (Bogino & Villalba 2008).

La variabilidad en las precipitaciones y los niveles de las aguas subterráneas pueden afectar el establecimiento de especies freatofitas. Los niveles de algunos acuíferos sufren cambios rápidos debido a la actividad humana, generando modificaciones en el paisaje. La extracción de agua subterránea para uso minero y urbano ha provocado la disminución del nivel freático del acuífero de la Pampa del Tamarugal en Chile. Sobre este acuífero se encuentra el Desierto de Atacama, considerado el lugar más seco de la Tierra, donde habita la especie freatófita *P. tamarugo* (Decuyper et al. 2016). Un estudio en anillos de árboles sobre el efecto de la extracción de agua subterránea en las tasas de crecimiento de *P. tamarugo* mostró que el crecimiento en zonas de alta extracción fue un 48 % más bajo que en zonas de menor extracción (Decuyper et al. 2016). Muchos de los árboles en de mayor impacto mostraron signos de estrés frente a niveles freáticos de 12 m de profundidad (Chávez et al. 2016). El descenso de los

niveles de las aguas subterráneas fué de aproximadamente 3 a 4 m (dejando los niveles a 8-12 m de profundidad) en las últimas décadas, provocando estrés hídrico en la copa de los árboles y reduciendo el crecimiento radial. La mitigación del manejo del agua es recomendada para permitir que las poblaciones se recuperen (Decuyper et al. 2016), especialmente al alcanzar los niveles freáticos los 11 m de profundidad (Garrido et al. 2016). En la misma zona, individuos de *P. burkartii* mostraron una mayor vulnerabilidad hidráulica durante las heladas de invierno (mayo-agosto), las cuales pueden producir cavitaciones en el xilema, conduciendo a una disminución del potencial hídrico (Carevic et al. 2017). Durante el final de la primavera y el verano, el acuífero de la Pampa del Tamarugal presenta tasas de recarga altas, proporcionando fuentes de agua continua para las poblaciones de árboles freatófitos, y presentando una mejor oportunidad para la extracción de agua con fines antrópicos que no perjudique la estabilidad de estas poblaciones. Estudios como los presentados pueden proporcionar datos útiles para gestionar el uso del agua y mantener los intereses de conservación.

La deforestación en conjunto con el aumento de las precipitaciones, ha provocado que los niveles de aguas subterráneas aumenten en ciertas áreas de los bosques de llanura dominados por el caldén (*P. caldenia*), en la Pampa argentina. El efecto de los diferentes niveles de agua subterránea en el crecimiento, establecimiento y supervivencia de *P. caldenia* se midió en un valle de agua subterránea poco profunda (0,5 m de profundidad) y en una meseta adyacente con agua subterránea profunda (8 m de profundidad) (Bogino & Jobbágy 2011). Mientras que un aumento de los niveles freáticos en el valle se asoció con la mortalidad de árboles, el aumento en la meseta condujo a un establecimiento y crecimiento mayor. En base a fotografías aéreas y descripciones de los habitantes locales, antes de 1960 el valle era el ambiente más favorable para el establecimiento de esta especie; el estudio sugiere que los cambios en los niveles de aguas subterráneas tienen efectos variables sobre el crecimiento y la persistencia de *Prosopis* dependiendo de las características del sitio, ya que son susceptibles al anegamiento. Estos datos son de importante consideración a la hora de evaluar los efectos del aumento en las napas freáticas sobre el ecosistema, incluyendo a las poblaciones humanas.

### **3.4 Dendroecología y manejo del bosque**

La disponibilidad de agua y la variabilidad hidrológica no solo afectan el crecimiento anual sino también la dinámica poblacional de las especies de *Prosopis*. La influencia del agua sobre este género interactúa con múltiples factores antrópicos, entre ellos la poda, la tala y el pastoreo. La madera de *P. ferox* es ampliamente utilizada como combustible y material de construcción, mientras que sus frutos sirven de alimento para el ganado. En la Quebrada de Humahuaca (Jujuy), Argentina, los bosques de *P. ferox* proporcionan el 70% de la energía utilizada por la población (Morales et al. 2005). El aumento en las precipitaciones observado durante 1950-1990 y la disminución en la intensidad de uso de la tierra beneficiaron el establecimiento de poblaciones locales de esta especie (Morales et al. 2005). Durante 1990-2000, una reducción de las lluvias afectó su establecimiento a pesar de existir una disminución constante de las presiones de pastoreo desde 1950, mostrando que la producción sostenible de madera en esta región depende del régimen de lluvias y es beneficiada por una reducción de la densidad de ganado (Morales et al. 2005).

La poda controlada en árboles pequeños de *P. flexuosa* promovió el crecimiento radial y aumentó el número de vasos en el xilema, disminuyendo su área (Giantomasi et al. 2015). Estos resultados sugieren

la formación de un hidrosistema más eficiente y resiliente, con un mayor número de vasos pequeños respondiendo a las demandas conductivas de la planta y reduciendo la probabilidad de embolismos, muchas veces generados en vasos de gran diámetro (Carlquist 2013). Los incrementos observados en el área basal del fuste principal no redujeron la densidad de la madera, manteniendo su potencial para el uso en construcciones y como combustible (Giantomasi et al. 2015).

En otro estudio, la eliminación de árboles de *P. flexuosa* dentro de un bosque generó parches ricos en recursos de nutrientes y disponibilidad de agua, potencialmente explotados por las raíces de árboles vecinos, generando una "liberación de crecimiento" entre los individuos restantes y promoviendo su crecimiento (Piraino et al. 2017)

El efecto de la variabilidad ambiental sobre el crecimiento de *P. flexuosa* y la producción de madera se demostró a lo largo de un gradiente latitudinal en el noreste de Argentina (Villagra et al. 2005b), donde el crecimiento medio, la densidad, el diámetro basal medio, la altura media, la cobertura del dosel y la biomasa total de la madera disminuyeron a lo largo de un gradiente norte-sur. La producción de madera varió entre los sitios, lo que revela que los árboles del norte presentan una calidad de madera superior ideal para su uso en la construcción, mientras que los bosques del sur pueden proporcionar refugio para el ganado y leña para el uso local (Villagra et al. 2005b).

La dendrocronología prefiere el uso de individuos unifustales para el muestreo. Un estudio sobre la sensibilidad de las cronologías de *P. flexuosa* comparó cronologías obtenidas de individuos unifustales con multifustales, encontrando que estas últimas presentaron una mayor correlación con la variabilidad climática, evidenciada por una mayor sensibilidad en la respuesta del crecimiento a años excepcionalmente lluviosos o secos (Piraino & Roig 2017). Estos hallazgos fueron explicados a través de la competencia por recursos entre fustes de un mismo árbol, promoviendo el estrés hídrico, generando una mayor sensibilidad frente a las variaciones de las precipitaciones. La aplicación de este estudio para comprender el papel de la dendrocronología en la gestión forestal se presenta como una herramienta para el uso sostenible de los bosques (Villagra et al. 2005b).

El establecimiento de árboles y arbustos en ecosistemas áridos y semiáridos también se encuentra influenciado por la variabilidad climática y modulado por la presión de la herbivoría. Un estudio comparativo de los efectos de ENOS y la herbivoría sobre *P. pallida* en Perú y *P. chilensis* en Chile, mostró que se reclutaron el doble de individuos en años ENOS en comparación con años sin este evento en Perú (Holmgren et al. 2006). El ancho de anillo fue 2,8 veces mayor durante años ENOS, pero en parcelas con herbivoría la supervivencia se redujo al 31%. Alternativamente, en Chile, no hubo correlación entre el establecimiento de árboles y la precipitación anual. Bajo eventos ENOS fuertes y con protección contra la herbivoría, solo el 8% de las plántulas sobrevivió, reflejando que otros factores como temperaturas más bajas y lluvias invernales podrían afectar el establecimiento en Chile (Holmgren et al. 2006). De forma similar, en la Quebrada de Humahuaca, Argentina, el establecimiento de *P. ferox* requirió al menos de 4 años con abundantes lluvias (Morales & Villalba 2012). Si bien los eventos extremos de lluvia indujeron la germinación y el establecimiento, sin lluvias persistentes y bajo los efectos de una alta densidad de ganado provocando la compactación del suelo, se dificultó la supervivencia de las plantas jóvenes (Morales & Villalba 2012).

Las especies freatofitas del género *Prosopis* juegan un rol indispensable en ambientes xéricos, con diversidad de especies asociadas a estos árboles formando ecosistemas boscosos. El establecimiento de bosques de *Prosopis* en zonas áridas y semiáridas representa una fuente de refugio y recursos, generando hábitat para la flora y fauna, así como recursos para el uso y consumo humano (Choge et al. 2007; Beresford-Jones et al. 2009; William & Jafri 2015).

#### 4. Conclusiones

Esta revisión recopila investigaciones sobre el género *Prosopis* y su relación con el agua en América del Sur, describiendo la investigación hasta la fecha e identificando su distribución espacial sobre gradientes geográficos, hidroclimáticos y altitudinales. Este trabajo resalta:

1. El potencial para expandir el rango geográfico de los estudios sobre hidrología usando a *Prosopis* a regiones húmedas con ausencia de una estación seca, regiones elevadas del noroeste de América del Sur y en la estepa patagónica.
2. La existencia de una frecuente correlación positiva entre el crecimiento anual y la precipitación, pudiendo estas camuflarse por la relación de las especies freatofitas con recursos de aguas subterráneas.
3. *Prosopis* representa un recurso humano con valores socioeconómicos y culturales en todo el continente americano; dado su valor y su declive histórico en muchas regiones, los datos que contribuyan al manejo sostenible y la conservación de esta especie son de suma importancia.

Las especies de *Prosopis* constituyen la principal fuente de datos dendrocronológicos en muchos ecosistemas áridos y semiáridos de América del Sur. Se identificaron lagunas geográficas en la investigación en climas subhúmedos y húmedos, estepas patagónicas y regiones de gran altitud en Bolivia, Ecuador, Colombia y Venezuela, donde los datos publicados son actualmente escasos. Teniendo en cuenta la creciente escasez de agua dulce en regiones donde se encuentra *Prosopis*, su contribución a la comprensión de las tendencias históricas en la disponibilidad de agua es crucial. La investigación del crecimiento leñoso, la integración de nuevos enfoques como las cronologías de tamaño de vasos, los anillos marcados por densidad y los isótopos estables de carbono y oxígeno pueden ayudar a enriquecer las bases de datos de anchos de anillo y mejorar nuestra comprensión de cómo este género proporciona herramientas únicas para la investigación del agua y su manejo a largo plazo.

## **5. Agradecimientos**

Esta investigación fue financiada por ANII (Agencia Nacional de Investigación e Innovación - Uruguay) Beca N° FCE\_1\_2019\_1\_155963.

S. Ambite fue apoyada por una Beca de Maestría ANII - Uruguay, No. POS\_FCE\_2020\_1\_1009193.

M.E. Ferrero fue apoyada parcialmente por ANPCyT, Argentina (PICT2019-01336). I.A.B. ANID - Subdirección de Capital Humano/Doctorado Nacional/2021-21212335.

## 6. Referencias

- Alcaraz-Segura D., Paruelo J.M., Epstein H.E., Cabello J., 2013. Environmental and human controls of ecosystem functional diversity in temperate South America. *Remote Sensing* 5, 127-154.
- Alvarez-Garreton C., Lara A., Boisier J.P., Galleguillos M., 2019. The impacts of native forests and forest plantations on water supply in Chile. *Forests* 10, 473.
- Ancajima E.A., 2017. Dendrocronología de *Prosopis sp.* en la Región Piura.
- Barría P., Rojas M., Moraga P., Muñoz A., Bozkurt D., Alvarez-Garreton C., 2019. Anthropocene and streamflow: Long-term perspective of streamflow variability and water rights. *Elementa: Science of the Anthropocene* 7.
- Beresford-Jones D.G., Arce S., Whaley O.Q., Chepstow-Lusty A.J., 2009. The role of *Prosopis* in ecological and landscape change in the Samaca Basin, lower Ica Valley, south coast Peru from the Early Horizon to the Late Intermediate Period. *Latin American Antiquity* 20, 303-332.
- Bogino S., 2014. The centenary pluviometer: a pioneer dendrochronological study in South America. *Dendrochronologia* 32, 52-54.
- Bogino S., Cangiano M.L., Dussart E., Medina A., Pineau V., Landa C., Montanari E., Doval J., Tapia A., 2019. Dendrochronological studies of indigenous and creole archeological remains in the Argentinean Pampas (19th and 20th centuries). *Dendrochronologia* 55, 25-32.
- Bogino S.M., Jobbágy E.G., 2011. Climate and groundwater effects on the establishment, growth and death of *Prosopis caldenia* trees in the Pampas (Argentina). *Forest Ecology and Management* 262, 1766-1774.
- Bogino S.M., Villalba R., 2008. Radial growth and biological rotation age of *Prosopis caldenia* Burkart in Central Argentina. *Journal of Arid Environments* 72, 16-23.
- Boninsegna J.A., Argollo J., Aravena J., Barichivich J., Christie D., Ferrero M., Lara A., Le Quesne C., Luckman B., Masiokas M., 2009. Dendroclimatological reconstructions in South America: a review. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 281, 210-228.
- Brienen R.J., Wanek W., Hietz P., 2011. Stable carbon isotopes in tree rings indicate improved water use efficiency and drought responses of a tropical dry forest tree species. *Trees* 25, 103-113.
- Bull A.T., Andrews B.A., Dorador C., Goodfellow M., 2018. *Introducing the Atacama desert*. Springer, 1269-1272.



- Burkart A., 1976. A monograph of the genus *Prosopis* (Leguminosae subfam. Mimosoideae). Journal of the Arnold arboretum, 450-525.
- Cangiano M.L., Cendoya M.A., Risio-Allione L.V., Bogino S.M., 2020. Dendroecology of *Prosopis* species in the world: Secular traces of natural and anthropic events and their effects on *Prosopis* growth, Latin American Dendroecology. Springer, 121-140.
- Carevic F.S., Delatorre-Herrera J., Carrasco A., 2017. Plant water variables and reproductive traits are influenced by seasonal climatic variables in *Prosopis burkartii* (Fabaceae) at Northern Chile. Flora 233, 7-11.
- Carlquist S., 2013. Comparative wood anatomy: systematic, ecological, and evolutionary aspects of dicotyledon wood. Springer Science & Business Media.
- Cavalcanti I., Carril A., Penalba O., Grimm A., Menéndez C., Sanchez E., Cherchi A., Sörensson A., Robledo F., Rivera J., 2015. Precipitation extremes over La Plata Basin—Review and new results from observations and climate simulations. Journal of hydrology 523, 211-230.
- Chávez R., Clevers J., Decuyper M., De Bruin S., Herold M., 2016. 50 years of water extraction in the Pampa del Tamarugal basin: Can *Prosopis tamarugo* trees survive in the hyper-arid Atacama Desert (Northern Chile)? Journal of Arid Environments 124, 292-303.
- Choge S., Pasiecznik N., Harvey M., Wright J., Awan S., Harris P., 2007. *Prosopis* pods as human food, with special reference to Kenya. Water Sa 33, 419-424.
- Coe M.T., Macedo M.N., Brando P.M., Lefebvre P., Panday P., Silvério D., 2016. The hydrology and energy balance of the Amazon basin, Interactions between biosphere, atmosphere and human land use in the Amazon basin. Springer, 35-53.
- Davidson E.A., de Araújo A.C., Artaxo P., Balch J.K., Brown I.F., Bustamante M.M., Coe M.T., DeFries R.S., Keller M., Longo M., 2012. The Amazon basin in transition. Nature 481, 321-328.
- De Micco, V., Battipaglia, G., Balzano, A., Cherubini, P., Aronne, G., 2016. Are wood fibres as sensitive to environmental conditions as vessels in tree rings with intra-annual density fluctuations (IADFs) in Mediterranean species? Trees 30, 971-983.
- Decuyper, M., Chávez, R.O., Copini, P., Sass-Klaassen, U., 2016. A multi-scale approach to assess the effect of groundwater extraction on *Prosopis tamarugo* in the Atacama Desert. Journal of Arid Environments 131, 25-34.
- Eckstein, D., 2004. Change in past environments: secrets of the tree hydrosystem. New Phytologist, 1-4.
- Fernández, A., Muñoz, A., González-Reyes, Á., Aguilera-Betti, I., Toledo, I., Puchi, P., Sauchyn, D.,

- Crespo, S., Frene, C., Mundo, I., 2018. Dendrohydrology and water resources management in south-central Chile: lessons from the Río Imperial streamflow reconstruction. *Hydrology and Earth System Sciences* 22, 2921-2935.
- Ferrero, M.E., Villalba, R., De Membiela, M., Hidalgo, L.F., Luckman, B.H., 2015. Tree-ring based reconstruction of Río Bermejo streamflow in subtropical South America. *Journal of Hydrology* 525, 572-584.
- Fonti, P., von Arx, G., García-González, I., Eilmann, B., Sass-Klaassen, U., Gärtner, H., Eckstein, D., 2010. Studying global change through investigation of the plastic responses of xylem anatomy in tree rings. *New Phytologist* 185, 42-53.
- Garreaud, R.D., Alvarez-Garreton, C., Barichivich, J., Boisier, J.P., Christie, D., Galleguillos, M., LeQuesne, C., McPhee, J., Zambrano-Bigiarini, M., 2017. The 2010–2015 megadrought in central Chile: Impacts on regional hydroclimate and vegetation. *Hydrology and earth system sciences* 21, 6307-6327.
- Garreaud, R.D., Boisier, J.P., Rondanelli, R., Montecinos, A., Sepúlveda, H.H., Veloso-Aguila, D., 2020. The central Chile mega drought (2010–2018): a climate dynamics perspective. *International Journal of Climatology* 40, 421-439.
- Garrido, M., Silva, P., Acevedo, E., 2016. Water relations and foliar isotopic composition of *Prosopis tamarugo* Phil., an endemic tree of the Atacama Desert growing at three levels of water table depth. *Frontiers in plant science* 7, 375.
- Ghezzi, I., Rodríguez, R., 2015. Primera serie dendroarqueológica en los Andes Centrales: resultados preliminares de Chankillo, Casma. *Bulletin de l'Institut français d'études andines*, 1-21.
- Giantomasi, M., Roig-Juñent, F., Patón-Domínguez, D., Massaccesi, G., 2012. Environmental modulation of the seasonal cambial activity in *Prosopis flexuosa* DC trees from the Monte woodlands of Argentina. *Journal of Arid Environments* 76, 17-22.
- Giantomasi, M.A., Alvarez, J.A., Villagra, P.E., Debandi, G., Roig-Juñent, F.A., 2015. Pruning effects on ring width and wood hydrosystem of *Prosopis flexuosa* DC from arid woodlands. *Dendrochronologia* 35, 71-79.
- Giantomasi, M.A., Junent, F.A.R., Villagra, P.E., Srur, A.M., 2009. Annual variation and influence of climate on the ring width and wood hydrosystem of *Prosopis flexuosa* DC trees using image analysis. *Trees* 23, 117-126.
- Giantomasi, M.A., Roig-Juñent, F.A., Villagra, P.E., 2013. Use of differential water sources by *Prosopis flexuosa* DC: a dendroecological study. *Plant Ecology* 214, 11-27.

Giordano, C.V., Guevara, A., Boccalandro, H.E., Sartor, C., Villagra, P.E., 2011. Water status, drought responses, and growth of *Prosopis flexuosa* trees with different access to the water table in a warm South American desert. *Plant Ecology* 212, 1123-1134.

GIS Development Team, 2020. QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. <http://qgis.osgeo.org>.

González Loyarte, M., Rodeghiero, A., Buk, E., Trione, S., 2000. Análisis comparativo de dos comunidades en el bosque de *Prosopis flexuosa* DC. del NE de Mendoza, Argentina. *Muldequina* 9, 75-89.

Guevara, A., Giordano, C.V., Aranibar, J., Quiroga, M., Villagra, P.E., 2010. Phenotypic plasticity of the coarse root system of *Prosopis flexuosa*, a phreatophyte tree, in the Monte Desert (Argentina). *Plant and soil* 330, 447-464.

Harris, I., Osborn, T.J., Jones, P., Lister, D., 2020. Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset. *Scientific data* 7, 1-18.

Holmgren, M., López, B.C., Gutierrez, J.R., Squeo, F.A., 2006. Herbivory and plant growth rate determine the success of El Niño Southern Oscillation-driven tree establishment in semiarid South America. *Global Change Biology* 12, 2263-2271.

Hoyer, S., Hamman, J., 2017. xarray: ND labeled arrays and datasets in Python. *Journal of Open Research Software* 5.

Humanes-Fuente, V., Ferrero, M.E., Muñoz, A.A., González-Reyes, Á., Requena-Rojas, E.J., Barichivich, J., Inga, J., Layme-Huaman, E.T., 2020. Two centuries of hydroclimatic variability reconstructed from tree-ring records over the Amazonian Andes of Peru. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 125, e2020JD032565.

Jobbágy, E., Noretto, M.D., Villagra, P.E., Jackson, R.B., 2011. Water subsidies from mountains to deserts: Their role in sustaining groundwater-fed oases in a sandy landscape. *Ecological Applications* 21, 678-694.

Jones, J., Almeida, A., Cisneros, F., Iroumé, A., Jobbágy, E., Lara, A., Lima, W.d.P., Little, C., Llerena, C., Silveira, L., 2017. Forests and water in South America. *Hydrological Processes* 31, 972-980.

Karlin, U., Díaz, R., 1984. Potencialidad y manejo de algarrobos en el árido subtropical argentino.

Klein, T., Randin, C., Körner, C., 2015. Water availability predicts forest canopy height at the global scale. *Ecology letters* 18, 1311-1320.

- Krebs, C., Fischer, G., 1931. El pluviómetro secular, Circular de la Sección de Propaganda e Informes del Ministerio de Agricultura 847. , República Argentina, pp. 1–24.
- Lehner, B., Grill, G., 2013. Global river hydrography and network routing: baseline data and new approaches to study the world's large river systems. *Hydrological Processes* 27, 2171-2186.
- López, B., Sabaté, S., Gracia, C., Rodríguez, R., 2005. Wood anatomy, description of annual rings, and responses to ENSO events of *Prosopis pallida* HBK, a wide-spread woody plant of arid and semi-arid lands of Latin America. *Journal of Arid Environments* 61, 541-554.
- Lopez, B.C., Rodríguez, R., Gracia, C.A., Sabate, S., 2006. Climatic signals in growth and its relation to ENSO events of two *Prosopis* species following a latitudinal gradient in South America. *Global Change Biology* 12, 897-906.
- Lucas, C., Aguilera-Betti, I., Muñoz, A.A., Puchi, P., Sapriza, G., Profumo, L., Maxwell, R.S., Venegas-González, A., 2022. Cross-continental hydroclimate proxies: Tree-rings in Central Chile reconstruct historical streamflow in Southeastern South American rivers. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 03091333211067466.
- Margolis, E.Q., Meko, D.M., Touchan, R., 2011. A tree-ring reconstruction of streamflow in the Santa Fe River, New Mexico. *Journal of Hydrology* 397, 118-127.
- McNally, A., 2018. NASA/GSFC/HSL. 2016. FLDAS VIC Land Surface Model L4 Monthly 0.25 x 0.25 Degree for Southern Africa (GDAS and RFE2) 1.
- Meglioli, P.A., Villagra, P.E., Aranibar, J.N., Magliano, P.N., Jobbágy, E.G., 2021. Sensitivity of groundwater levels and chemistry to partial removal of vegetation in *Prosopis* woodlands of the Monte Desert, Argentina. *Journal of Hydrology* 598, 126264.
- Morales, M., Barberena, R., Belardi, J.B., Borrero, L., Cortegoso, V., Durán, V., Guerci, A., Goñi, R., Gil, A., Neme, G., 2009. Reviewing human–environment interactions in arid regions of southern South America during the past 3000 years. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 281, 283-295.
- Morales, M.S., Cook, E.R., Barichivich, J., Christie, D.A., Villalba, R., LeQuesne, C., Srur, A.M., Ferrero, M.E., González-Reyes, Á., Couvreur, F., 2020. Six hundred years of South American tree rings reveal an increase in severe hydroclimatic events since mid-20th century. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 117, 16816-16823.
- Morales, M.S., Villalba, R., 2012. Influence of precipitation pulses on long-term *Prosopis ferox* dynamics in the Argentinean intermontane subtropics. *Oecologia* 168, 381-392.
- Morales, M.S., Villalba, R., Boninsegna, J.A., 2005. Climate, land-use and *Prosopis ferox* recruitment in the Quebrada de Humahuaca, Jujuy, Argentina. *Dendrochronologia* 22, 169-174.

- Morales, M.S., Villalba, R., Grau, H.R., Paolini, L., 2004. Rainfall-controlled tree growth in high-elevation subtropical treelines. *Ecology* 85, 3080-3089.
- Morales, M.S., Villalba, R., Grau, H.R., Villagra, P.E., Boninsegna, J.A., Ripalta, A., Paolini, L., 2001. Potencialidad de *Prosopis ferox* Griseb (Leguminosae, subfamilia: Mimosoideae) para estudios dendrocronológicos en desiertos subtropicales de alta montaña. *Revista chilena de historia natural* 74, 865-872.
- Muñoz, A.A., González-Reyes, A., Lara, A., Sauchyn, D., Christie, D., Puchi, P., Urrutia-Jalabert, R., Toledo-Guerrero, I., Aguilera-Betti, I., Mundo, I., 2016. Streamflow variability in the Chilean Temperate-Mediterranean climate transition (35 S–42 S) during the last 400 years inferred from tree-ring records. *Climate Dynamics* 47, 4051-4066.
- Muñoz, A.A., Klock-Barría, K., Alvarez-Garretón, C., Aguilera-Betti, I., González-Reyes, A., Lastra, J.A., Chávez, R.O., Barría, P., Christie, D., Rojas-Badilla, M., 2020. Water crisis in Petorca Basin, Chile: The combined effects of a mega-drought and water management. *Water* 12, 648.
- Nepstad, D., Lefebvre, P., Lopes da Silva, U., Tomasella, J., Schlesinger, P., Solorzano, L., Moutinho, P., Ray, D., Guerreira Benito, J., 2004. Amazon drought and its implications for forest flammability and tree growth: A basin-wide analysis. *Global change biology* 10, 704-717.
- Nogueira, F.d.C., Pagotto, M.A., Aragão, J.R.V., Roig, F.A., Ribeiro, A.d.S., Lisi, C.S., 2019. The hydrological performance of *Prosopis juliflora* (Sw.) growth as an invasive alien tree species in the semiarid tropics of northeastern Brazil. *Biological Invasions* 21, 2561-2575.
- Olson, E., Dodd, J., Rivera, M., 2020. *Prosopis sp.* tree-ring oxygen and carbon isotope record of regional-scale hydroclimate variability during the last 9500 years in the Atacama Desert. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 538, 109408.
- Pasiecznik, N., Harris, P.J., Smith, S.J., 2004. Identifying tropical *Prosopis* species: a field guide. HDRA Publishing Coventry.
- Piraino, S., Abraham, E.M., Diblasi, A., Roig Juñent, F.A., 2015. Geomorphological-related heterogeneity as reflected in tree growth and its relationships with climate of Monte Desert *Prosopis flexuosa* DC woodlands. *Trees* 29, 903-916.
- Piraino, S., Abraham, E.M., Hadad, M.A., Patón, D., Juñent, F.A.R., 2017. Anthropogenic disturbance impact on the stem growth of *Prosopis flexuosa* DC forests in the Monte desert of Argentina: dendroecological approach. *Dendrochronologia* 42, 63-72.
- Piraino, S., Roig, F.A., 2016. Assessing the Sensitivity of Riparian Algarrobo Dulce (DC) Radial Growth to Hydrological Changes. *Geochronometria* 43, 1-8.

- Piraino, S., Roig, F.A., 2017. Diferencias en el hábito de crecimiento como variable explicativa de la influencia climática en *Prosopis flexuosa* en el Desierto del Monte Central (Argentina). Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica 52, 523-533.
- Rice, J.L., Woodhouse, C.A., Lukas, J.J., 2009. Science and Decision Making: Water Management and Tree-Ring Data in the Western United States 1. JAWRA Journal of the American Water Resources Association 45, 1248-1259.
- Rivera, M.A., Moya, J., Shea, D.E., 2010. Dendrocronología en la Pampa del Tamarugal, Desierto de Atacama, Norte de Chile. Diálogo Andino-Revista de Historia, Geografía y Cultura Andina, 33-50.
- Rodríguez, R., Mabres, A., Luckman, B., Evans, M., Masiokas, M., Ektvedt, T.M., 2005. “El Niño” events recorded in dry-forest species of the lowlands of northwest Peru. Dendrochronologia 22, 181-186.
- Roig, F., 1993. Informe nacional para la selección de germoplasma en especies de *Prosopis* de la República Argentina. Contribuciones mendocinas a la Quinta Reunión Regional para América Latina y el Caribe de la Red de Forestación del CIID, 1-37.
- Salazar, P.C., Navarro-Cerrillo, R.M., Ancajima, E., Duque Lazo, J., Rodríguez, R., Ghezzi, I., Mabres, A., 2018. Effect of climate and ENSO events on *Prosopis pallida* forests along a climatic gradient. Forestry: An International Journal of Forest Research 91, 552-562.
- Sauchyn, D., Vanstone, J., Jacques, J.-M.S., Sauchyn, R., 2015. Dendrohydrology in Canada’s western interior and applications to water resource management. Journal of hydrology 529, 548-558.
- Shackleton, R.T., Le Maitre, D.C., Pasiecznik, N.M., Richardson, D.M., 2014. *Prosopis*: a global assessment of the biogeography, benefits, impacts and management of one of the world's worst woody invasive plant taxa. AoB plants 6.
- Staal, A., Flores, B.M., Aguiar, A.P.D., Bosmans, J.H., Fetzer, I., Tuinenburg, O.A., 2020. Feedback between drought and deforestation in the Amazon. Environmental Research Letters 15, 044024.
- Van Rossum, G., Drake, F., 2009. Python 3 reference manual createspace. Scotts Valley, CA.
- Villagra, P., Villalba, R., Boninsegna, J., 2005a. Structure and growth rate of *Prosopis flexuosa* woodlands in two contrasting environments of the central Monte desert. Journal of Arid Environments 60, 187-199.
- Villagra, P.E., Boninsegna, J.A., Alvarez, J.A., Cony, M., Cesca, E., Villalba, R., 2005b. Dendroecology of *Prosopis flexuosa* woodlands in the Monte desert: Implications for their management. Dendrochronologia 22, 209-213.

Villagra, P.E., Roig, F.A., 1997. Wood structure of *Prosopis alpataco* and *Prosopis argentina* growing under different edaphic conditions. Iawa Journal 18, 37-51.

Villagra, P.E., Vilela, A., Giordano, C., Alvarez, J.A., 2010. Ecophysiology of *Prosopis* species from the arid lands of Argentina: What do we know about adaptation to stressful environments? Desert plants. Springer, pp. 321-340.

Villalba, R., 1985. Xylem Structure and Cambial Activity in *Prosopis flexuosa* DC. IAWA Journal 6, 119-130.

Villalba, R., Boninsegna, J., 1989. Dendrochronological studies on *Prosopis flexuosa* DC. IAWA Journal 10, 155-160.

Villalba, R., Villagra, P., Boninsegna, J.A., Morales, M., Moyano, V., 2000. Dendroecología y dendroclimatología con especies del género *Prosopis* en Argentina. Multequina 9, 01-18.

William, K., Jafri, L., 2015. Mesquite (*Prosopis juliflora*): Livestock grazing, its toxicity and management. Journal of Bioresource Management 2, 7.

Woodhouse, C., Lukas, J., 2006. Drought, tree rings and water resource management in Colorado. Canadian Water Resources Journal 31, 297-310.

## 7. Anexo

**Tabla 1.** Investigaciones incluidas en la revisión, incluyendo país, provincia, sitio, latitud, longitud, especie, año de publicación, autores, sub-área focal (Dendroclimatología, Dendroecología, Dendrohidrología, Anatomía), precipitación media anual (PMA), humedad del suelo de 0-10 cm (HS), elevación (msnm) y sistema de clasificación climática Köppen (Kopp)

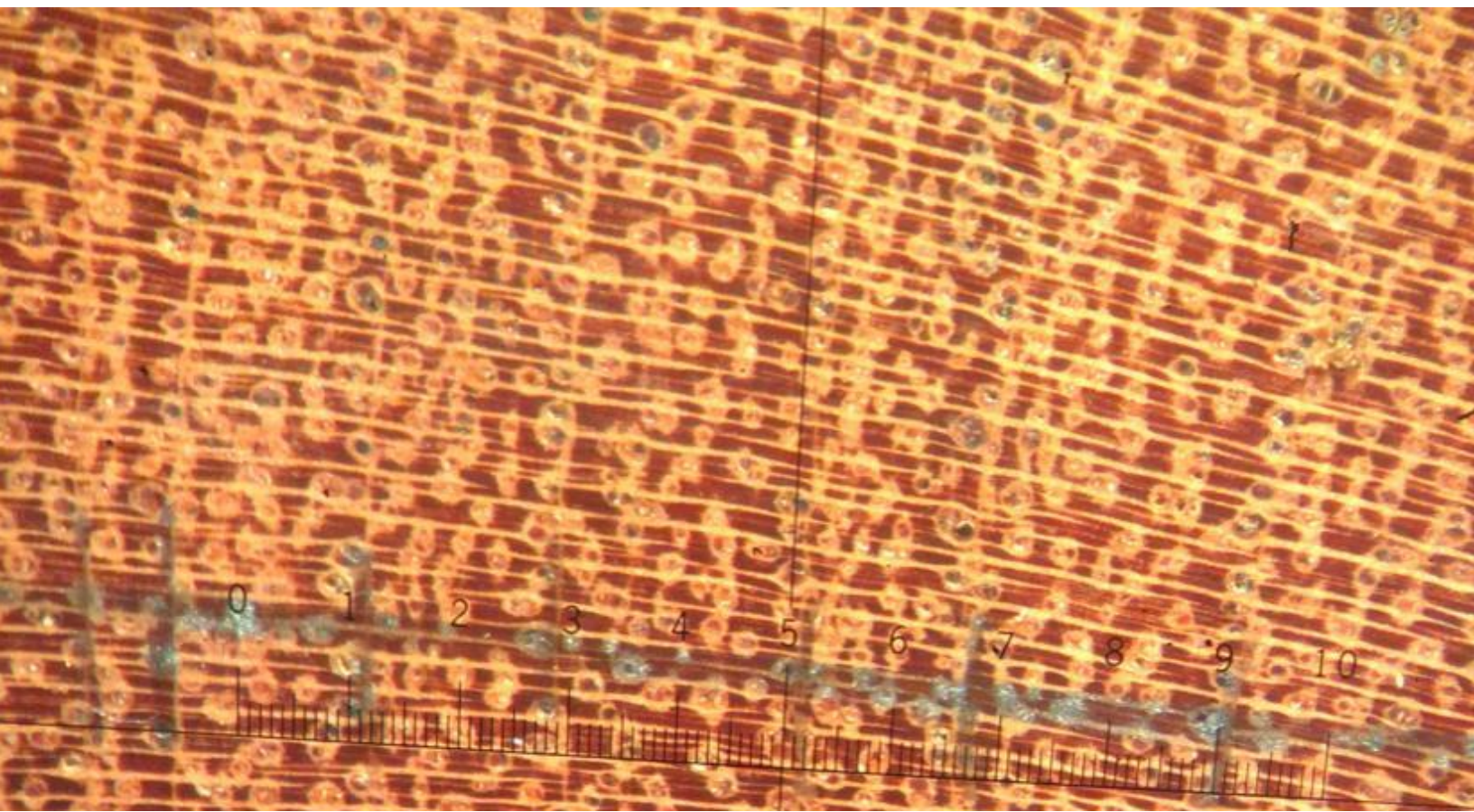
| Prov.            | Sitio               | lat    | lon    | Especie                              | Año  | Autores          | Sub-Área    | PMA | HS    | Elev | Kopp |
|------------------|---------------------|--------|--------|--------------------------------------|------|------------------|-------------|-----|-------|------|------|
| <b>PERÚ</b>      |                     |        |        |                                      |      |                  |             |     |       |      |      |
| MOR              | Rinconada           | -4.54  | -81    | <i>P. pallida</i>                    | 2017 | Ancajima EA      | Dendroclim  | 107 | 0.167 | 403  | 4    |
| PIU              | Ignacio Távora      | -5.8   | -80.18 | <i>P. pallida</i>                    | 2017 | Ancajima EA      | Dendroclim  | 131 | 0.158 | 93   | 4    |
| SAP              | Piura               | -5.1   | -80.38 | <i>P. pallida</i>                    | 2017 | Ancajima EA      | Dendroclim  | 199 | 0.163 | 211  | 4    |
| MOR              | Rinconada           | -4.54  | -81.1  | <i>P. pallida</i>                    | 2018 | Salazar et al.   | Dendroclim  | 81  | 0.159 | 158  | 4    |
| PIU              | Piura               | -5.1   | -80.38 | <i>P. pallida</i>                    | 2018 | Salazar et al.   | Dendroclim  | 199 | 0.163 | 211  | 4    |
| SAP              | Ignacio Távora      | -5.12  | -80.11 | <i>P. pallida</i>                    | 2018 | Salazar et al.   | Dendroclim  | 295 | 0.188 | 98   | 4    |
| PIU              | Piura               | -5.1   | -80.38 | <i>P. pallida</i>                    | 2005 | López et al.     | Dendroclim  | 199 | 0.163 | 211  | 4    |
| PIU              | Piura               | -5.1   | -80.38 | <i>P. pallida</i>                    | 2006 | López et al.     | Dendroclim  | 199 | 0.163 | 211  | 4    |
| CAS              | Casma               | -9.51  | -78.22 | <i>P. pallida</i>                    | 2006 | López et al.     | Dendroclim  | 179 | 0.182 | 152  | 4    |
| NAZ              | Nazca               | -14.83 | -74.93 | <i>P. pallida</i>                    | 2006 | López et al.     | Dendroclim  | 66  | 0.204 | 597  | 4    |
| PI               | Piura               | -5.1   | -80.37 | <i>P. pallida</i>                    | 2006 | Holmgren         | Dendroclim  | 202 | 0.164 | 213  | 4    |
| CAS              | Áncash              | -9.33  | -78.14 | <i>P. spp</i>                        | 2015 | Ghezzi et al.    | Dendroclim. | 299 | 0.195 | 791  | 4    |
| CAS              | Áncash              | -9.33  | -78.14 | <i>P. pallida</i>                    | 2005 | Rodríguez et al. | Dendroclim  | 299 | 0.195 | 791  | 4    |
| <b>BRAZIL</b>    |                     |        |        |                                      |      |                  |             |     |       |      |      |
| BAH              | Paulo Alfonso       | -9.1   | -38.09 | <i>P. juliflora</i>                  | 2019 | Carvalho et al.  | Dendroclim  | 544 | 0.225 | 489  | 6    |
| <b>CHILE</b>     |                     |        |        |                                      |      |                  |             |     |       |      |      |
| TAR              | Caserones           | -20.9  | -69.61 | <i>P. spp</i>                        | 2019 | Olson et al.     | Dendroclim  | 26  | 0.174 | 934  | 5    |
| TAR              | Ramaditas           | -20.99 | -69.2  | <i>P. spp</i>                        | 2019 | Olson et al.     | Dendroclim  | 49  | 0.163 | 1687 | 5    |
| TAR              | Guatacondo          | -21.03 | -69.46 | <i>P. spp</i>                        | 2019 | Olson et al.     | Dendroclim  | 37  | 0.151 | 914  | 5    |
| TAR              | Salar de Llamara    | -21.36 | -69.59 | <i>P. spp</i>                        | 2019 | Olson et al.     | Dendroclim  | 30  | 0.162 | 766  | 5    |
| TAR              | Iquique             | -20.14 | -70.08 | <i>P. burkartii</i>                  | 2017 | Carevic et al.   | Dendrohidro | 5   |       | 860  | 5    |
| TAR              | Tamarugal           | -20.28 | -69.38 | <i>P. tamarugo</i>                   | 2016 | Decuyper et al.  | Dendrohidro | 28  | 0.182 | 1629 | 5    |
| TAR              | Salar de Pintados   | -20.32 | -69.43 | <i>P. tamarugo</i>                   | 2016 | Chavez et al.    | Dendrohidro | 27  | 0.180 | 1249 | 5    |
| TAR              | Salar de Bellavista | -20.43 | -69.37 | <i>P. tamarugo</i>                   | 2016 | Chavez et al.    | Dendrohidro | 31  | 0.176 | 1250 | 5    |
| TAR              | Q. Guatacondo       | -21.01 | -69.22 | <i>P. alba</i><br><i>P. tamarugo</i> | 2010 | Rivera et al.    | Dendroclim  | 50  | 0.161 | 1588 | 5    |
| COC              | Fray Jorge          | -30.41 | -71.37 | <i>P. chilensis</i>                  | 2006 | Holmgren         | Dendroclim  | 126 | 0.185 | 213  | 5    |
| TAR              | Iquique             | -21.21 | -69.35 | <i>P. tamarugo</i>                   | 2016 | Garrido et al.   | Dendrohidro | 48  | 0.149 | 1048 | 5    |
| COC              | Limari              | -30.43 | -71.43 | <i>P. chilensis</i>                  | 2006 | López et al.     | Dendroclim  | 130 | 0.183 | 158  | 5    |
| <b>ARGENTINA</b> |                     |        |        |                                      |      |                  |             |     |       |      |      |



|     |                    |        |        |                    |       |                   |             |     |       |      |   |
|-----|--------------------|--------|--------|--------------------|-------|-------------------|-------------|-----|-------|------|---|
| JUJ | Q. Humahuaca       | -23.1  | -65.2  | <i>P. ferox</i>    | 2012  | Morales et al.    | Dendroclim  | 513 | 0.291 | 3990 | 7 |
| JUJ | Q. Humahuaca       | -23.1  | -65.2  | <i>P. ferox</i>    | 2004  | Morales et al.    | Dendroclim  | 513 | 0.291 | 3990 | 7 |
| JUJ | Q. Humahuaca       | -23.1  | -65.2  | <i>P. ferox</i>    | 2002  | Villagra et al.   | Wood A.     | 513 | 0.291 | 3990 | 7 |
| SAL | Valles Calchaquies | -26    | -66    | <i>P. flexuosa</i> | 2002  | Villagra et al.   | Wood A.     | 622 | 0.268 | 1895 | 5 |
| CAT | Pipanaco           | -28    | -66    | <i>P. flexuosa</i> | 2002  | Villagra et al.   | Wood A.     | 541 | 0.252 | 2500 | 7 |
| MEN | Telteca            | -32.5  | -68    | <i>P. flexuosa</i> | 2002  | Villagra et al.   | Wood A.     | 220 | 0.197 | 565  | 5 |
| MEN | Ñacuñán            | -34    | -67    | <i>P. flexuosa</i> | 2002  | Villagra et al.   | Wood A.     | 429 | 0.228 | 425  | 7 |
| JUJ | Churquiaguada      | -23.11 | -65.19 | <i>P. ferox</i>    | 2001  | Morales et al.    | Dendroclim  | 521 | 0.292 | 3970 | 7 |
| JUJ | Q. Sapagua         | -23.08 | -65.21 | <i>P. ferox</i>    | 2001  | Morales et al.    | Dendroclim  | 504 | 0.290 | 4124 | 7 |
| CAT | Pipanaco           | -27.58 | -66.1  | <i>P. flexuosa</i> | 2005  | Villagra et al.   | Dendroeco   | 577 | 0.252 | 1854 | 7 |
| MEN | Telteca            | -32.2  | -67.52 | <i>P. flexuosa</i> | 2005  | Villagra et al.   | Dendroeco   | 282 | 0.200 | 505  | 4 |
| MEN | Ñacuñán            | -34.03 | -67.58 | <i>P. flexuosa</i> | 2005  | Villagra et al.   | Dendroeco   | 345 | 0.220 | 482  | 5 |
| COR | El Álamo           | -31.36 | -65.3  | <i>P. flexuosa</i> | 2013  | Giantomasi et al. | Dendrohidro | 561 | 0.235 | 1100 | 7 |
| SL  | Luján              | -32.21 | -65.58 | <i>P. flexuosa</i> | 2013  | Giantomasi et al. | Dendrohidro | 582 | 0.252 | 460  | 6 |
| MEN | Santa Luisa        | -32.3  | -67.57 | <i>P. flexuosa</i> | 2013  | Giantomasi et al. | Dendrohidro | 277 | 0.201 | 507  | 4 |
| COR | Chancaní           | -31.4  | -65.43 | <i>P. flexuosa</i> | 1989  | Villalba et al.   | Dendroclim  | 551 | 0.229 | 395  | 6 |
| MEN | Telteca            | -32.9  | -68    | <i>P. flexuosa</i> | 1989  | Villalba et al.   | Dendroclim  | 240 | 0.203 | 591  | 5 |
| MEN | Pozo Verde         | -32.06 | -68.07 | <i>P. flexuosa</i> | 2015  | Piraino et al.    | Dendroclim  | 185 | 0.193 | 541  | 4 |
| MEN | La Juana           | -32.14 | -67.51 | <i>P. flexuosa</i> | 2015  | Piraino et al.    | Dendroclim  | 281 | 0.200 | 510  | 4 |
| MEN | El Mateo           | -32.14 | -67.41 | <i>P. flexuosa</i> | 2015  | Piraino et al.    | Dendroclim  | 299 | 0.201 | 508  | 4 |
| MEN | Puesto Viejo       | -32.18 | -67.38 | <i>P. flexuosa</i> | 2015  | Piraino et al.    | Dendroclim  | 307 | 0.203 | 504  | 4 |
| MEN | Río Viejo          | -32.18 | -67.38 | <i>P. flexuosa</i> | 2015  | Piraino et al.    | Dendroclim  | 307 | 0.203 | 504  | 4 |
| MEN | Caferino           | -32.19 | -67.42 | <i>P. flexuosa</i> | 2015  | Piraino et al.    | Dendroclim  | 300 | 0.202 | 505  | 4 |
| MEN | Puesto Viejo       | -32.18 | -67.38 | <i>P. flexuosa</i> | 2015  | Piraino et al.    | Dendroclim  | 307 | 0.203 | 504  | 4 |
| MEN | Telteca            | -32.2  | -68    | <i>P. flexuosa</i> | 2005b | Villagra et al.   | Dendroeco   | 204 | 0.195 | 539  | 4 |
| MEN | Ñacuñán            | -34.03 | -67.58 | <i>P. flexuosa</i> | 2005b | Villagra et al.   | Dendroeco   | 345 | 0.220 | 482  | 5 |
| MEN | El Mateo           | -32.14 | -67.41 | <i>P. flexuosa</i> | 2016  | Piraino et al.    | Dendrohidro | 299 | 0.201 | 508  | 4 |
| MEN | Telteca            | -32.2  | -68    | <i>P. flexuosa</i> | 2009  | Guevara et al.    | Dendrohidro | 204 | 0.195 | 539  | 4 |
| MEN | Pozo Verde         | -32.06 | -68.01 | <i>P. flexuosa</i> | 2017  | Piraino et al.    | Dendrohidro | 194 | 0.193 | 536  | 4 |
| MEN | La Juana           | -32.14 | -67.51 | <i>P. flexuosa</i> | 2017  | Piraino et al.    | Dendrohidro | 281 | 0.200 | 510  | 4 |
| MEN | El Mateo           | -32.14 | -67.41 | <i>P. flexuosa</i> | 2017  | Piraino et al.    | Dendrohidro | 299 | 0.201 | 508  | 4 |
| MEN | Puesto Viejo       | -32.18 | -67.38 | <i>P. flexuosa</i> | 2017  | Piraino et al.    | Dendrohidro | 307 | 0.203 | 504  | 4 |
| MEN | Río Viejo          | -32.18 | -67.38 | <i>P. flexuosa</i> | 2017  | Piraino et al.    | Dendrohidro | 307 | 0.203 | 504  | 4 |
| MEN | Caferino           | -32.19 | -67.42 | <i>P. flexuosa</i> | 2017  | Piraino et al.    | Dendrohidro | 300 | 0.202 | 505  | 4 |
| MEN | Puesto Viejo       | -32.18 | -67.38 | <i>P. flexuosa</i> | 2017b | Piraino et al.    | Dendrohidro | 307 | 0.203 | 504  | 4 |
| MEN | Puesto Viejo       | -32.18 | -67.38 | <i>P. flexuosa</i> | 2011  | Jóbbágy et al     | Dendrohidro | 307 | 0.203 | 504  | 4 |
| MEN | Telteca            | -32.2  | -68    | <i>P. alpataco</i> | 2011  | Jóbbágy et al     | Dendrohidro | 204 | 0.195 | 539  | 4 |

|     |                  |        |        |                                       |      |                   |             |     |       |     |    |
|-----|------------------|--------|--------|---------------------------------------|------|-------------------|-------------|-----|-------|-----|----|
| MEN | Asunción         | -32.22 | -68.14 | <i>P. alpataco</i>                    | 1997 | Villagra et al.   | Dendroclim  | 192 | 0.197 | 560 | 4  |
| MEN | Telteca          | -32.2  | -68    | <i>P. argentina</i>                   | 1997 | Villagra et al.   | Dendroclim  | 204 | 0.195 | 539 | 4  |
| MEN | Puesto La Penca  | -32.25 | -68    | <i>P. flexuosa</i>                    | 2011 | Giordano et al.   | Dendrohidro | 207 | 0.195 | 542 | 4  |
| MEN | Telteca          | -32.24 | -67.7  | <i>P. flexuosa</i>                    | 2021 | Meglioli et al.   | Dendrohidro | 250 | 0.198 | 516 | 4  |
| SL  | Puesto El Águila | -34.3  | -65.37 | <i>P. caldenia</i>                    | 2011 | Bogino et al.     | Dendroclim  | 639 | 0.264 | 389 | 7  |
| SL  | Luján            | -32.21 | -65.58 | <i>P. flexuosa</i>                    | 2009 | Giantomasi et al. | Wood A.     | 582 | 0.252 | 460 | 6  |
| MEN | Telteca          | -32.5  | -67.5  | <i>P. flexuosa</i>                    | 2015 | Giantomasi et al. | Dendroeco   | 299 | 0.205 | 497 | 4  |
| SL  | Las Isletas      | -33.44 | -65.31 | <i>P. caldenia</i>                    | 2008 | Bogino et al.     | Dendrohidro | 662 | 0.253 | 670 | 13 |
| SL  | Don Roberto      | -34    | -65.22 | <i>P. caldenia</i>                    | 2008 | Bogino et al.     | Dendrohidro | 675 | 0.252 | 404 | 7  |
| SL  | Las Taguas       | -34.21 | -65.35 | <i>P. caldenia</i>                    | 2008 | Bogino et al.     | Dendrohidro | 646 | 0.268 | 398 | 7  |
| SL  | El Liberal       | -32.25 | -65.07 | <i>P. caldenia</i>                    | 2008 | Bogino et al.     | Dendrohidro | 636 | 0.264 | 701 | 10 |
| MEN | Ñacuñán          | -34    | -67    | <i>P. flexuosa</i>                    | 1985 | Villalba          | Dendroclim  | 429 | 0.228 | 425 | 7  |
| COR |                  | -35    | -65    | <i>P. caldenia</i>                    | 2018 | Risio et al.      | Dendroclim  | 654 | 0.263 | 265 | 7  |
| LP  | Ingeniero Foster | -35.42 | -65.04 | <i>P. caldenia</i>                    | 2014 | Bogino            | Wood A.     | 655 | 0.246 | 302 | 7  |
| LP  | Las Vertientes   | -36.34 | -65.28 | <i>P. caldenia</i><br><i>P. ferox</i> | 2019 | Bogino            | Dendroclim  | 628 | 0.262 | 296 | 7  |
| LP  | Naicó            | -36.57 | -65.21 | <i>P. caldenia</i><br><i>P. ferox</i> | 2019 | Bogino            | Wood A.     | 595 | 0.262 | 279 | 7  |





Anillos de crecimiento en *Prosopis affinis*, observados a través de la lupa (x40) (crédito de foto S. Ambite).

### Capítulo 3

## Anillos de crecimiento anual en *Prosopis* L. y su relación con el clima en el litoral del Río Uruguay



## Resumen

En las últimas décadas, han ido en aumento los esfuerzos por mejorar el entendimiento de la variabilidad histórica del clima en el sureste de América del Sur. Una valiosa herramienta a la hora de evaluar y reforzar los registros climáticos es la Dendrocronología -el estudio de los anillos de crecimiento en plantas leñosas-, la cuál ha contribuído a la reconstrucción de la frecuencia y severidad de la variabilidad climática y sus impactos en los ecosistemas. Sin embargo, en regiones tropicales y subtropicales de baja elevación, cómo la región Pampeana, los datos dendrocronológicos se encuentran limitados. Un género que ha demostrado alto potencial dendrocronológico en América del Sur es *Prosopis* L., encontrándose ampliamente distribuído, presentando anillos anuales y especies longevas. Este trabajo evalúa la relación entre el crecimiento anual de *Prosopis affinis* (Spreng) y *Prosopis nigra* (Griseb) Hieron., dos especies nativas del bosque parque uruguayo, y la variabilidad climática regional y global, a través de análisis dendrocronológicos. Se presentan tres cronologías de ancho de anillo en 3 sitios en el noreste de Uruguay, usando 80 series (radios de medición) de 41 árboles. Se realizó la datación cruzada de los anillos anuales y se comparó el crecimiento en el período de 1897 a 2008 con la variabilidad climática, incluyendo precipitación, temperatura, Índice Estandarizado de Precipitación-Evaporación (SPEI), índice reconstruido de Sequías de Sudamérica (SADA), El Niño Oscilación Sur (ENOS), Modo Anular del Sur (SAM), Índice de Oscilación Sur (SOI) e índice de Humedad en Suelo (FLDAS). Este trabajo es el primero en demostrar el potencial dendrocronológico del género *Prosopis* en Uruguay, con cronologías con una señal poblacional expresada (Expressed Population Signal (EPS)) >0,80 en los tres sitios. La variabilidad del ancho de anillo estuvo fuertemente correlacionada con la disponibilidad de agua. El crecimiento estuvo positivamente correlacionado ( $r=0,39^{***}$ ;  $r=0,38^{***}$ ) con la precipitación acumulada en primavera-verano de la temporada de crecimiento en las dos cronologías ubicadas en sitios altos (SA) (43-48 msnm), y negativamente correlacionado ( $r=-0,31^{**}$ ) con la precipitación acumulada a fines del invierno e inicios de la temporada de crecimiento, con la cronología ubicada en el sitio bajo (SB) (16 msnm). Además de la importancia de las condiciones locales, otras variables climáticas fueron clave, corroboradas por la correlación positiva ( $r=0,27^{**}$ ;  $r=0,42^{***}$ ) de SA y la correlación negativa ( $r=-0,31^{**}$ ) de SB con SPEI; y la correlación negativa ( $r=-0,29^{***}$ ;  $r=-0,39^{***}$ ) de SA y la correlación positiva ( $r=0,23^{**}$ ) de SB con la temperatura. Los índices ENOS, SAM y SOI se correlacionaron con las cronologías, a través de sus efectos en el régimen de precipitaciones y temperatura. Estos hallazgos reflejan el potencial del género *Prosopis* - inclusive en Uruguay - para la investigación dendrocronológica y la reconstrucción climática en la región, aportando al entendimiento de la relación entre el crecimiento leñoso de bosques nativos y la variabilidad histórica del clima.

**Palabras clave:** Dendrocronología; Variabilidad climática; *Prosopis nigra*; *Prosopis affinis*

Nota: \*  $p<0.01$ , \*\*  $p<0.01$ , \*\*\* $p<0.001$



## 1. Introducción

La dendrocronología es la ciencia que se encarga del estudio y la datación de los anillos de crecimiento anuales en plantas leñosas (Fritts 1976; Speer 2010). Estos se observan como bandas concéntricas diferenciadas, visibles en las secciones transversales de los tallos con crecimiento secundario, formándose por un cambio en el tamaño, espesor y coloración de la pared de las células del xilema, en respuesta a cambios en las condiciones del ambiente y también a condicionantes genéticas (Kaennel & Schweingruber 1995).

Algunos de los factores externos más importantes que afectan el crecimiento son la disponibilidad de agua, la temperatura, la luz, el dióxido de carbono, el oxígeno y los minerales en el suelo (Fritts 1976); sin embargo todo factor que afecte el proceso de crecimiento, cómo el número de días nublados, la humedad relativa y la fuerza del viento puede quedar registrado en los anillos si representa una limitación para el crecimiento (Speer 2010).

La variaciones en las condiciones climáticas han mostrado una gran correlación con la variabilidad en el ancho de los anillos de crecimiento, abocado a la dendrocronología en el estudio de la variabilidad climática, consagrándose como una herramienta paleoclimática poderosa para registrar eventos recientes (Hughes 2002, Speer 2010). Se pueden obtener cronologías de anillos de crecimiento que se extienden hasta 10.000 años atrás ( Pilcher et al. 1984; Ferguson et al. 1985; Becker 1993; Friedrich et al. 2004) y cronologías usando madera petrificada que aportan información sobre la variabilidad climática ocurrida millones de años atrás (Chaloner & Creber 1973; Falcon-Lang 1999).

En América del Sur en los últimos 40 años se han realizado más de 300 cronologías de ancho de anillo, la mayoría en la región sur de la cordillera de los Andes, en las regiones áridas de Argentina, Chile, Perú y Bolivia y algunas pocas en regiones subtropicales con estacionalidad marcada (Boninsegna et al. 2009). Entre las especies seleccionadas para realizar las dataciones cronológicas, se destaca el género *Prosopis* L., con resultados que evidencian su capacidad para detectar la variabilidad climática local (precipitación, temperatura, sequía) y global (El Niño Oscilación Sur (ENOS), Modo Anular del Sur (SAM) (Villalba 1985, Villagra & Roig 1997, López et al. 2005, Holmgren et al. 2006, Bogino & Jobbágy 2011, Decuyper et al. 2016, Ancajima 2017, Salazar et al. 2018; Carvalho et al. 2019; Ambite et al. 2022).

En el bioma Pampa, los datos dendrocronológicos son escasos, pero han resultado valiosos a la hora de evaluar cambios históricos en la hidrología (Bogino & Jobbágy 2011). Dado el aumento en las precipitaciones observado en América del Sur desde la década de 1970 (Barros et al. 2008; Varuolo et al. 2021; Llano et al. 2021) y la tendencia a que esta situación continúe frente a futuros escenarios de cambio climático (IPCC 2021), entender cómo la variabilidad en el régimen de lluvias puede afectar la productividad y el crecimiento de los árboles representa una prioridad (Lucas et al. 2017).

Uruguay, al no tener una estacionalidad marcada en cuanto a precipitaciones (Mendina & Pisciotano 2002; Panario 2014, Barreiro et al. 2019) y no poseer especies gimnospermas leñosas nativas, donde la datación es más sencilla (en comparación con especies de angiospermas), se ha visto rezagada en el



desarrollo de la dendrocronología. Hasta la fecha se han realizado en el país cinco investigaciones utilizando anillos de crecimiento en árboles (Profumo 2010, Martino 2012), tres de ellas incluyendo cronologías (Piaz 2020) y sólo dos analizando una especie nativa, *Scutia buxifolia* Reissek (Ferreira 2016, Lucas 2018).

En Uruguay pueden encontrarse dos especies nativas leñosas del género *Prosopis*, *Prosopis affinis* (Spreng) y *Prosopis nigra* (Griseb) Hieron., dominantes en la sabana arbolada de planicie (bosque parque) ((Brussa & Grela 2007; Haretche et al. 2012; MGAP et al. 2018). *Prosopis*, con más de 55 cronologías de ancho de anillo realizadas en América del sur (Cangiano 2020, Ambite et al. 2022) presenta una oportunidad única para realizar estudios dendrocronológicos con un género ampliamente estudiado y compararse con datos en otras regiones de América del Sur, aportando nueva información para Uruguay basada en nuevas especies, necesaria para dilucidar si las respuestas observadas en las investigaciones realizadas hasta la fecha son especie específicas o responden a cambios en el régimen climático.

Esta tesis plantea evaluar la capacidad dendrocronológica del género *Prosopis* en el litoral del Río Uruguay y analizar la relación entre su crecimiento y la variabilidad climática local y global. Este trabajo pretende aportar información a la extensa red dendrocronológica de América del Sur, en una región con datos sumamente escasos y con características climáticas particulares.

## 1.2 Objetivos

El objetivo general de este trabajo es evaluar el potencial dendrocronológico de las especies *Prosopis affinis* y *Prosopis nigra*, nativas de la sabana arbolada de planicie en el Litoral del Río Uruguay, y probar su capacidad para estimar variables climáticas locales y globales.

Como objetivos específicos se plantea:

1. Evaluar si las especies seleccionadas producen anillos de crecimiento anuales identificables.
2. La creación de cronologías de ancho de anillo en tres sitios sobre el litoral del Río Uruguay.
3. La correlación de las cronologías con variables climáticas como la precipitación, la temperatura, el índice Estandarizado de Precipitación-Evaporación (SPEI), índice reconstruido de Sequías de Sudamérica (South America Drought Index (SADA)), El Niño Oscilación Sur (ENOS), el Modo Anular del Sur (SAM), el Índice de Oscilación Sur (Southern Oscillation Index (SOI)) y el índice de Humedad en Suelo 0-40 cm.

## 2. Materiales y métodos

### 2.1 Área de estudio

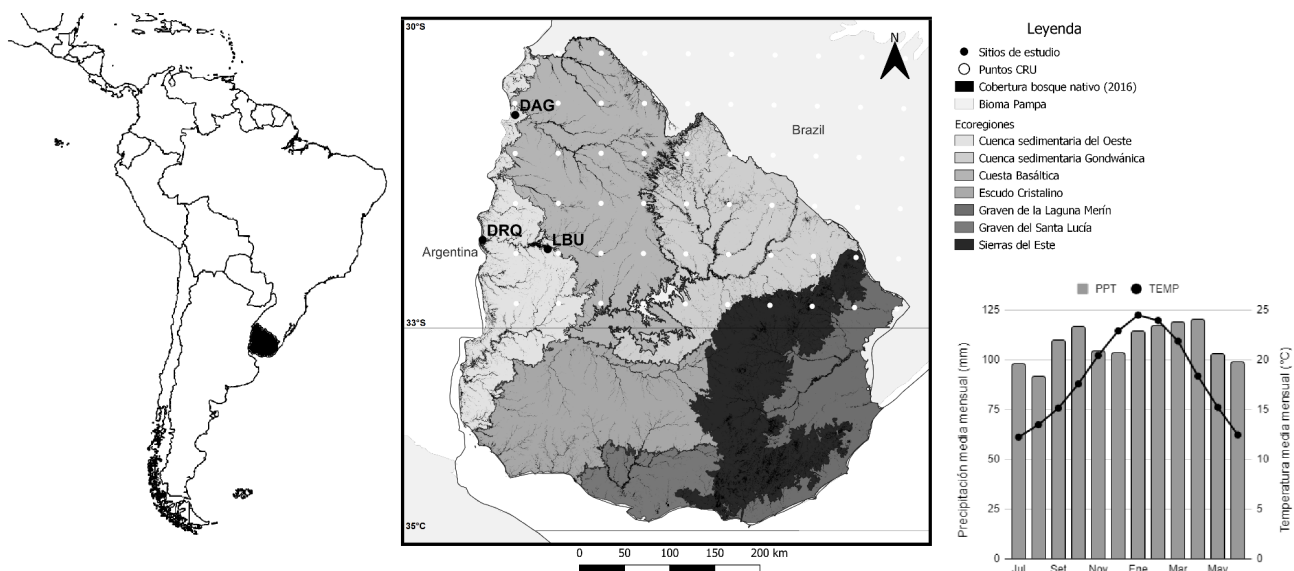
Las muestras de anillos de crecimiento fueron tomadas de árboles nativos del género *Prosopis* presentes en sabanas arboladas de planicie (bosques parque) en el litoral del Río Uruguay, en la zona oeste de Uruguay, entre las latitudes 30 y 33°S (Fig. 1). Estos se encuentran dentro de la ecorregión Cuenca sedimentaria del Oeste, formando parte del bioma Pampa, una amplia región del sureste de América del Sur, caracterizada por la presencia de pastizales naturales, agricultura y ganadería extensiva (Soriano 1992; Paruelo et al. 2010; Brazeiro 2015).

Uruguay presenta un clima subtropical húmedo (clasificación de Köppen), con precipitaciones promedio anuales de 1.200 mm por año. Las lluvias ocurren sin una estacionalidad marcada a lo largo de todo el año (Mendina & Pisciotto 2002; Barreiro et al. 2019), siendo marzo el mes con mayor precipitación promedio con 140 mm y diciembre el que presenta las menores precipitaciones de 100 mm para todo el país. Las precipitaciones en el Uruguay se caracterizan por su extrema irregularidad y variabilidad interanual (Barreiro et al. 2019). La temperatura media anual es de 17,5°C, las temperaturas medias más altas se presentan en el mes de enero y febrero (24 °C) y las medias más bajas en junio y julio (11 °C) (Bidegain & Renom 2002; Bartaburu 2009). Datos climáticos para todo el país pueden obtenerse de la base de datos grillados del Climate Research Unit (CRU) TS.

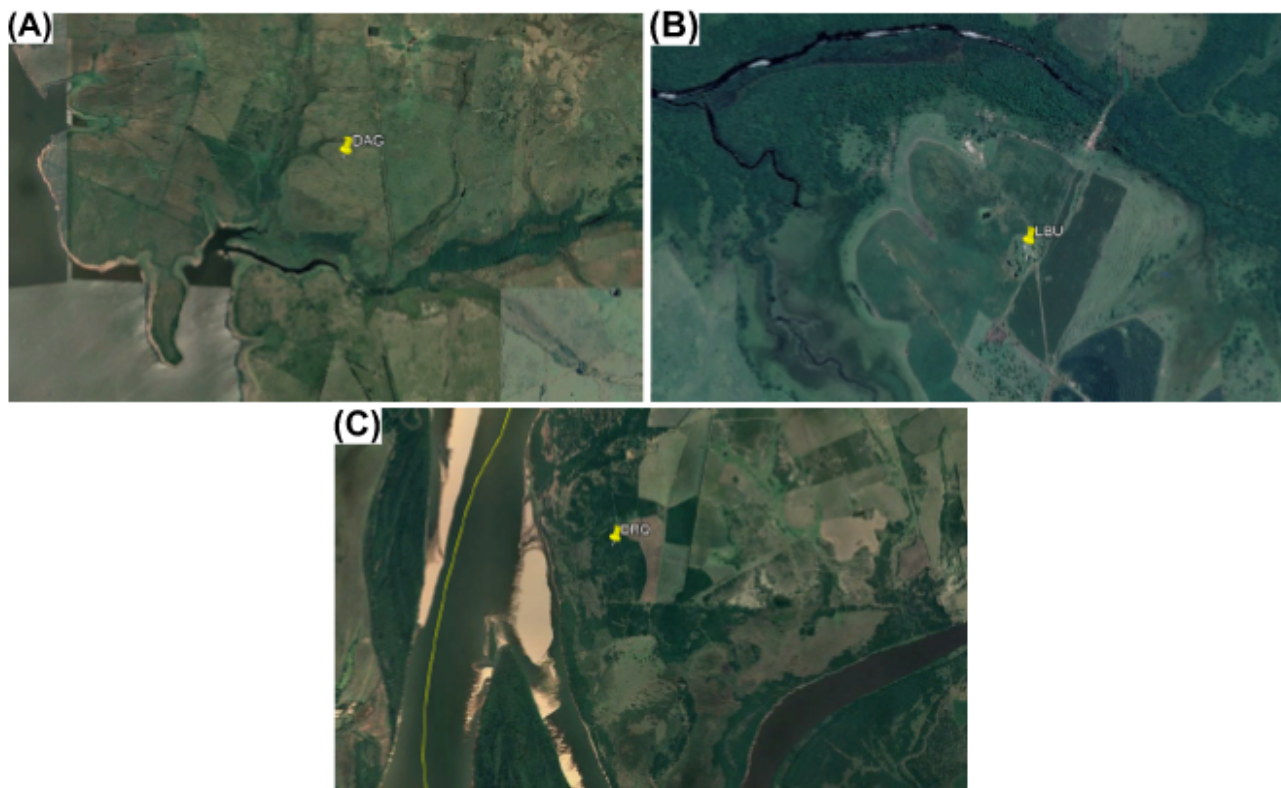
Fueron seleccionados como sitios de estudio tres campos privados, dos ubicados en el departamento de Paysandú: Laguna del Burro (LBU) y Desembocadura Río Queguay , (DRQ) y uno en el departamento de Salto: Desembocadura Arapey Grande (DAG) (Fig. 1; Fig. 2). La selección de sitios se hizo en conjunto con la Dirección General Forestal (DGF) del Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca (MGAP) bajo los criterios: 1) Sitios con áreas amplias de sabana arbolada, 2) predios con registro legal de los bosques y planes de manejo vigentes en los sitios de colecta de ejemplares vivos, 3) sitios con abundantes ejemplares de *Prosopis sp.*, especialmente muertos en pie. En el caso del sitio vinculado al Área Protegida “Montes del Queguay” del Sistema Nacional de Áreas Protegidas (SNAP) (sitio LBU), se obtuvo su apoyo para retirar muestras exclusivamente de madera muerta dentro del Área.

**Tabla 1.** Descripción de los sitios de estudio en el litoral oeste de Uruguay, incluyendo departamento (Dep.), sitio (Desembocadura Arapey Grande (DAG), Laguna del Burro (LBU) y Desembocadura Río Queguay (DRQ)), latitud (Lat.), longitud (Long.), elevación promedio (msnm)(Elev.), especie de estudio (Sp.) y cuerpo de agua más cercano.

| Dep.     | Sitio | Lat.        | Long.       | Elevación (m) | Sp.               | Cuerpo de Agua                 |
|----------|-------|-------------|-------------|---------------|-------------------|--------------------------------|
| Salto    | DAG   | -32°04'39'' | -58°06'06'' | 43            | <i>P. affinis</i> | R. Uruguay<br>R. Arapey Grande |
| Paysandú | LBU   | -32°12'08'' | -57°22'08'' | 48            | <i>P. affinis</i> | R. Queguay Grande              |
| Paysandú | DRQ   | -30°52'31'' | -57°45'17'' | 16            | <i>P. nigra</i>   | R. Uruguay                     |



**Figura 1.** Mapa de Uruguay indicando los sitios de muestreo de *Prosopis*, Desembocadura Arapey Grande (DAG), Laguna del Burro (LBU) y Desembocadura Río Queguay (DRQ), mostrando la cuadrilla CRU TS de datos climáticos. A la derecha, el climatograma de la zona de estudio mostrando la precipitación anual (barras) y la temperatura (puntos) basados en datos CRU de 1900-2018.



**Figura 2.** Mapa satelital de la ubicación de los sitios de estudio. (A) Desembocadura Arapey Grande (DAG); (B) Laguna del Burro (LBU); (C) Desembocadura Río Queguay (DRQ).

## 2.2 Especie de estudio

El género *Prosopis* L. de la familia Fabaceae cuenta con 44 especies distribuidas en zonas áridas y semiáridas (Burkart 1976; Pasiecznik et al. 2004) de Asia (3 sp.), África (1 sp.) y América (40 sp.), siendo en su mayoría exclusivas de América del sur (31 sp.) con Argentina como centro de biodiversidad (Burkart 1976). Uruguay cuenta con dos especies nativas, *Prosopis affinis* (Spreng) y *Prosopis nigra* (Griseb.) Hieron., perennes en Argentina y en Uruguay (Brussa y Grela, 2007).

En Uruguay, estas especies conforman la sabana arbolada de planicie (bosque parque) como árboles de hasta 10 m de altura con un tronco tortuoso y copas aparasoladas (Brussa & Grela 2007; Fagundez 2015). Presentan espinas y no son fácilmente diferenciables, distinguiéndose principalmente por las zonas donde se desarrollan, mientras que *P. affinis* se encuentra en suelos profundos y bien drenados, *P. nigra* se encuentra únicamente en suelos halomórficos llamados “blanqueales” (Fagundez 2015). Ambas son categorizadas como especies freatofitas, *P. affinis* como facultativa y *P. nigra* como obligada (Antezana et al. 2000; Fagundez 2015), confirmando adaptaciones ecológicas particulares. La madera de estas especies es altamente valorada para combustión y construcción, con una densidad que alcanza los 900 Kg/m<sup>3</sup> seca (INTI-CITEMA 2003) dificultando la toma de muestras con taladros de incremento. *P. affinis* y *P. nigra* forman anillos de crecimiento anuales, marcados por una fina línea de células parénquima terminal con poros grandes sobre la misma (Fig. 4. Villalba et al. 2000), a pesar de que no se conoce el periodo exacto de formación de los anillos, se cree que el cambium es activado a fines del invierno e inicio de la primavera, marcando el periodo vegetativo entre Agosto/ Septiembre y Junio/Julio del siguiente año calendario, igual que otros árboles nativos en la región (Lucas et al. 2018).

## 2.3 Diseño de estudio

### 2.3.1 Muestreo y desarrollo de las cronologías

Tres cronologías de ancho de anillo fueron desarrolladas, dos usando *P. affinis* en base a N=16 árboles en el sitio Laguna del Burro (LBU) y en base a N=9 árboles en el sitio Desembocadura del Río Arapey Grande (DAG); una cronología se realizó usando muestras de *P. nigra* en base a N=16 árboles en el sitio Desembocadura del Río Queguay (DRQ).

Debido a las leyes vigentes que prohíben la tala de especies nativas (Ley Forestal N° 15.939), promulgada en 1987 (Ley Forestal 15.939 1987), las muestras fueron extraídas de ejemplares muertos en pie o caídos, madera de postes de campo, tocones de árboles extraídos en años anteriores, y en algunos sitios de pocos árboles vivos con autorización de corte por las autoridades de gestión de bosque nativo. Se intentó tomar muestras no destructivas de árboles vivos con taladros de incremento, pero en todas las ocasiones la alta densidad de la madera provocó que se rompiera la herramienta (Lucas com. pers), impidiendo el uso de muestras vivas para el desarrollo de las cronologías. Las muestras de madera muerta fueron tomadas de ejemplares grandes, con descomposición mínima y, cuando posible, a 1,3 m de la altura del tronco (altura del pecho). Se extrajeron discos (cortes transversales) con motosierra del tronco, seleccionando el más adecuado para su posterior lijado. La extracción de discos y no barrenos mejora la medición, dadas las dificultades para barrenar especies de madera densa y las dificultades para

realizar dataciones cruzadas en tarugos de especies tropicales y subtropicales (Groenendijk et al. 2015) debido a la presencia de anillos falsos (Villalba et al. 2000).

Los discos obtenidos de la madera de *P. affinis* y *P. nigra* fueron lijados con papel de lija de graduación sucesivamente ascendente de 60 a 2000 g cm<sup>-2</sup> con el fin de visualizar los anillos de crecimiento a escala microscópica (10-100x). Los anillos fueron identificados visualmente, siguiéndolos en torno a la circunferencia de cada disco y marcándolos en 4 radios por disco (segmentos) evitando irregularidades en la madera, para facilitar la identificación de anillos falsos como anillos que no se encontrasen presentes en toda la circunferencia.

El ancho de anillo fue medido usando una Tabla Unislide VELMEX (Velmex, NY), conectada a un contador digital. Fué usado el método de datación cruzada para demostrar la presencia de anillos anuales de crecimiento (Stahle 1999). Los anillos fueron datados de acuerdo a la convención del Hemisferio Sur de asignar el año del anillo al año del inicio de su formación (Schulman 1956).

Cronologías de ancho de anillos fueron desarrolladas para cada sitio siguiendo el estándar para métodos dendrocronológicos (Stokes & Smiley, 1968). El control de calidad y la corrección de las series (radios de medición) datadas fue realizado utilizando COFECHA (Holmes 1983). Este programa fue utilizado para comparar la correlación de los segmentos visualmente datados en una serie a una cronología promedio o “master” basada en todas las series. Además fué usado para la identificación de anillos ausentes o falsos y para datar correctamente las series, basado en la suposición de que todas las series de un mismo sitio deben compartir una señal de crecimiento común en respuesta a variaciones temporales en fenómenos regionales como el clima.

ARSTAN fué usado para desarrollar cronologías residuales y estándar (Cook & Holmes 1996). La sensibilidad media (medida de la variación año a año del ancho de anillo de las series (Speer 2010)) fué usada para evaluar la variación interanual entre las series de ancho de anillo (Fritts 1976). La señal poblacional expresada (Expressed Population Signal (EPS)) fué usada para evaluar la fuerza de una señal de crecimiento común a lo largo del tiempo y modificar las cronologías cuando la misma disminuye en sectores con menor número de réplicas, al inicio de las cronologías. Fueron probadas combinaciones de 20-, 32- y 40-años de spline de suavizado cúbico (modelo empírico que usa curvas flexibles que se ajustan a un intervalo para remover señales asociadas a la edad o variaciones a largo plazo) y ventanas de barra  $r$  (estadístico usado para examinar la fuerza de la señal poblacional a lo largo de la cronología) de 15, 20, 30 y 40 años (Wigley et al. 1984) para encontrar la cronología con el valor EPS más alto para cada segmento. Finalmente las series correctamente datadas fueron ingresadas en un spline de suavizado cúbico de 32 años y una ventana  $r$  de 30 años con una superposición de 15 años, con el fin de estandarizar los datos removiendo la larga influencia antrópica experimentada en estos bosques, seleccionando un spline para remover estas señales capaces de afectar los patrones de crecimiento a largo plazo. A través de este programa desarrollamos un índice de ancho de anillo (IAA) basado en series estandarizadas, para construir cronologías máster.

### 2.3.2. Datos climáticos y análisis

La temperatura mensual media de 1901-2020, la precipitación mensual acumulada de 1901-2020 y el índice estandarizado de precipitación-evapotranspiración (Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index (SPEI)) para el periodo 1901-2018 fué obtenida de Climate Research Unit (CRU) serie TS 4.03 (Harris et al., 2014) disponible en The Royal Netherlands Meteorological Institute (KNMI) para los datos grillados cercanos a los 3 sitios de estudio presentes en la zona superior al Río Negro de Uruguay (30-33,5°S, 59-53°O), con características climáticas diferentes a las observadas en la zona inferior de Uruguay influenciada por variables costeras (Barreiro et al. 2019).

La influencia de ENOS en la precipitación y el crecimiento de *P. affinis* y *P. nigra* fué evaluada utilizando el índice El Niño 3.4 ([https://psl.noaa.gov/gcos\\_wgsp/Timeseries/Nino34](https://psl.noaa.gov/gcos_wgsp/Timeseries/Nino34)). Con el fin de obtener más información fué evaluada la influencia de la Oscilación Antártica (Southern Annular Mode (SAM)) y del índice de Oscilación Sur (Southern Oscillation Index (SOI)) obtenidos del Hadley Centre Sea Ice and Sea Surface Temperature data set (HadISST) (Rayner et al. 2003). Finalmente, fue obtenido el índice reconstruido de Sequías de Sudamérica (South America Drought Index (SADA)) de verano (Diciembre-Febrero) de El Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia ((CR)2) entre 1400-2019 (Morales et al. 2020) y el índice de humedad en suelo 0-40 cm (FLDAS) para el período de 1982-2018 obtenido de KNMI Climate Explorer para los sitios de estudio.

Mapas de correlación de estas variables con las cronologías de ancho de anillo fueron obtenidos en KNMI Climate Explorer (Trouet & Van Oldenborgh 2013).

### 2.3.3. Análisis estadístico

La correlación lineal entre el ancho de anillo anual y las variables climáticas fue evaluada con tests de correlación comunmente usadas en análisis dendro-climáticos (Blasing et al. 1984; Biondi & Waikul 2004) para identificar la ventana temporal con la correlación más alta para cada cronología en un periodo de 32 meses de enero del año calendario hasta dos años antes del comienzo de la temporada de crecimiento en agosto, continuando hasta el fin de la temporada de crecimiento austral cuando la radiación fotosintéticamente activa (fPAR) se encuentra en su mínimo (Lucas et al. 2017). Fue usada la correlación múltiple de Pearson para comparar el crecimiento anual de los anillos con los datos climáticos en ventanas de tiempo de 1-12 meses para determinar el periodo de meses consecutivos con la mayor correlación para cada cronología usando R 4.1.0 (R Core Team 2022). Este método toma en cuenta el potencial efecto retrasado de la precipitación en el crecimiento de los árboles (Fritts 1976). Los coeficientes de correlación de Pearson fueron usados para probar las relaciones entre los predictores de variables climáticas (ej: Temperatura y precipitación). Fueron usados modelos mixtos para testear los efectos de la precipitación acumulada, PDSI y temperatura media en las cronologías estándar, usando corCompSymm (Compound Symmetry Correlation Structure) como la estructura de autocorrelación en el paquete nlm (Pinheiro et al. 2013).



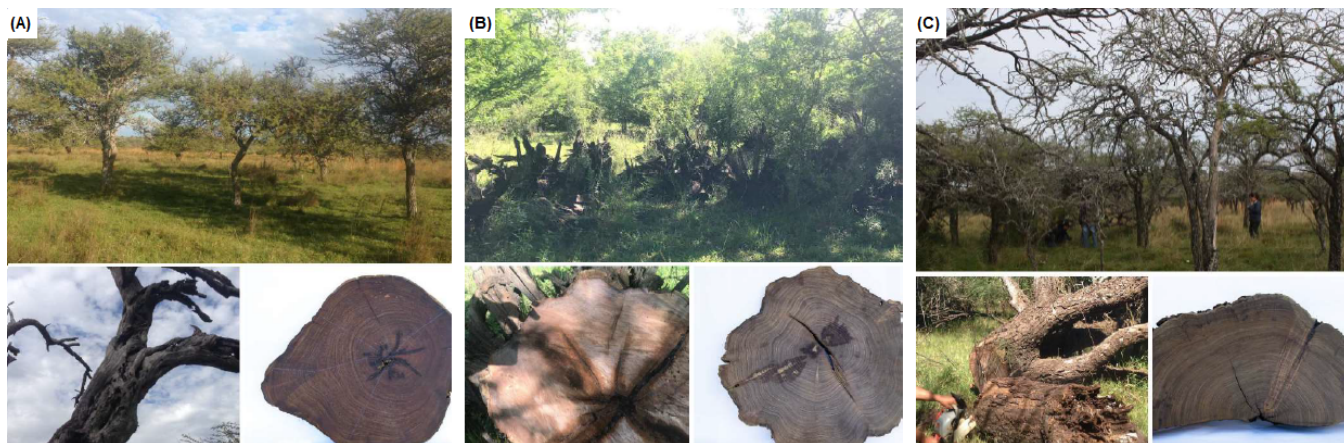
### 3. Resultados

#### 3.1. Anillos de crecimiento en *Prosopis*

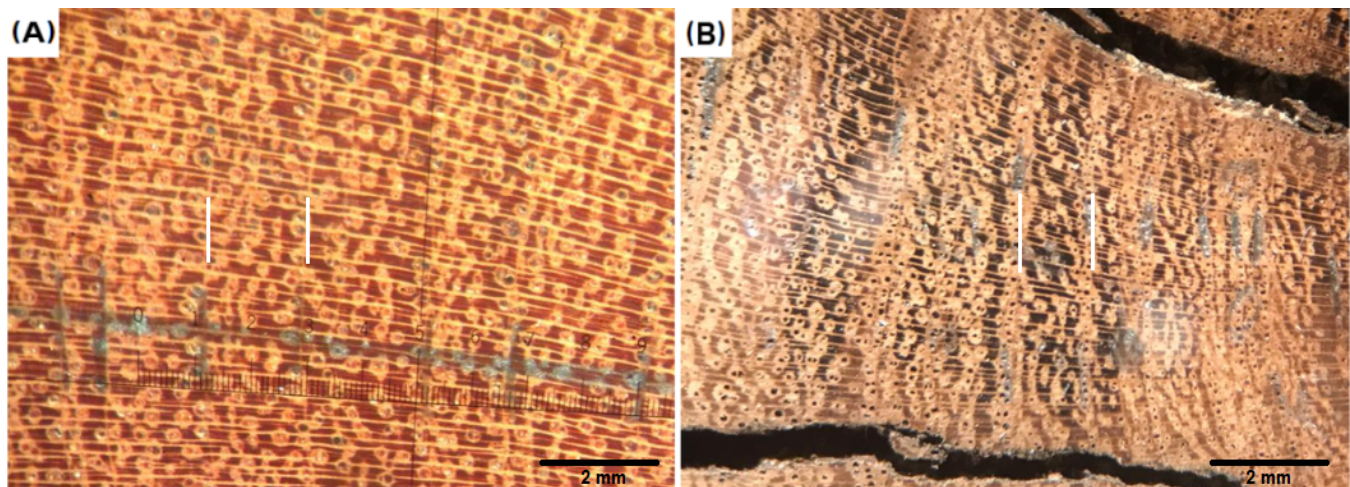
La identificación de anillos de crecimiento en *P. affinis* y *P. nigra* fué facilitada con el uso de discos enteros en lugar de tarugos, y la calidad del lijado previo a la medición (Fig. 3). Los anillos de crecimiento fueron identificados por la presencia de una fina línea continua de células de parénquima terminal, precedida por una línea de vasos de mayor tamaño al iniciarse un nuevo anillo (Fig. 4; Villalba et al. 2000). En cada anillo, la porosidad es semi-circular, con vasos de mayor tamaño al inicio y menores al finalizar el anillo, sin distinciones de color entre el leño temprano y el tardío (Fig. 4). La presencia de anillos falsos fué común, identificable por la ausencia de un anillo continuo en torno al disco. Se desconoce el periodo exacto de formación de los anillos de crecimiento, pero se supone que él mismo ocurre durante la fase vegetativa de crecimiento de agosto/septiembre a junio/julio del año calendario siguiente (Lucas et al. 2018), siguiendo lo observado en otras especies de *Prosopis* del Cono Sur (Villalba 1985, 2000).

En ambas especies, la coloración de la madera varió, siendo marrón oscura (raramente con tonos violeta) en algunos ejemplares y clara - amarillenta en otros. La edad y el DAP (Diámetro a la altura del pecho) de los ejemplares fue altamente variable, con discos de gran tamaño de edades menores (DRQ11 DAP: 60 cm; años: 81) a discos de menor tamaño (DRQ6 DAP: 42 cm; años: 95).

Los discos de menor tamaño y alto número de años presentaron una mayor dificultad para el marcado de anillos de crecimiento, debido a que pasados los primeros 20 años de vida el tamaño de los anillos fué < 1,0 mm. La visibilidad de los anillos fué más obvia durante los primeros 20 años de la muestra, donde los mismos son amplios y separados, siendo más difícil su medición a medida que nos acercamos a la corteza donde los anillos se encuentran reducidos y comprimidos. La marcación de anillos en la albura (en caso de contar los discos con una zona periférica clara, no siempre presente) resultó más difícil que en el duramen, al confundirse la línea de parénquima terminal clara con el color claro de la albura.



**Figura 3.** Sitios de estudio (A) Desembocadura Arapey Grande (DAG), (B) Laguna del Burro (LBU) y (C) Desembocadura Río Queguay (DRQ), incluyendo algunas de las muestras antes y después de ser preparadas. (Crédito de fotos: C. Lucas y C. López González)



**Figura 4.** Anillos de crecimiento anual en (A) *P. affinis* y (B) *P. nigra*, observados a través de la lupa binocular. Los límites de un anillo de crecimiento marcados por la línea de parénquima terminal se encuentran indicados con una línea blanca. (Crédito de fotos: S. Ambite)

### 3.2. Patrones de crecimiento

Todas las cronologías obtenidas fueron flotantes, es decir, sin incluir muestras vivas para anclar los anillos más recientes a una fecha exacta. Esto se debe a que al intentar tomar muestras vivas con taladros de incremento se rompió la herramienta debido a la alta densidad de la madera (900 Kg/m<sup>3</sup> seca (INTI-CITEMA 2003)) (Lucas com. Pers).

Para aproximar las cronologías a una fecha exacta, fueron usados datos de observaciones obtenidas por los habitantes de los sitios (los cuales conocían el año de corte de numerosas muestras) y de eventos históricos de inundaciones y sequías extremas para nuestro país (SINAE MIDES 2020), sumado a la comparación con cronologías en la región (Bogino et al. 2011; Morales et al. 2004; 2012, Risio et al. 2018). Posteriormente, las cronologías fueron corregidas usando el software COFECHA, con el fin de encontrar coincidencias en las tendencias de crecimiento entre los segmentos de cada sitio (Speer 2010). Las cronologías fueron a su vez correlacionadas entre sí para observar coincidencias entre las mismas, designando la fecha de inicio de cada cronología.

Fue obtenida una cronología para cada uno de los tres sitios. Una cronología con *P. affinis* obtenida del sitio DAG, en base a 15 series y 9 árboles, abarcando de 1897-1981, con mayor número de réplicas (N de series > 6) a partir de 1925. Una cronología con *P. affinis* del sitio LBU, en base a 31 series de 16 árboles, cubriendo el periodo entre 1923-2002, estando bien replicada (N de series > 6) entre 1929-1997. Una cronología de *P. nigra* del sitio DRQ, en base a 32 series y 17 árboles, cubriendo el periodo entre 1900-2009, estando bien replicada (N de series > 6) entre 1908-2008 (Fig. 6; Tabla 2).

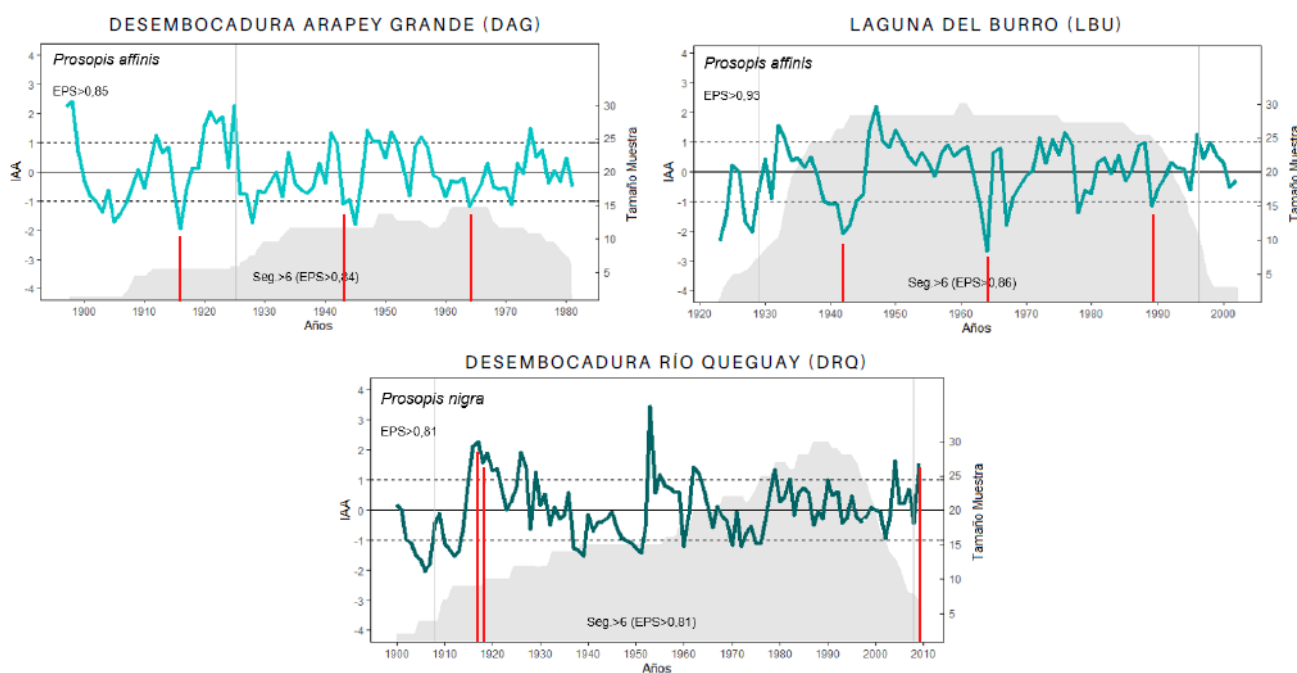
El ancho de los anillos de crecimiento para ambas especies fue altamente variable, con alta sensibilidad y baja correlación interanual entre anillos. El sitio DAG presentó la mayor sensibilidad (0.352), seguido por DRQ (0.339) y LBU (0.334).



La intercorrelación entre series fue mayor en el sitio LBU que la observada en DAG para *P. affinis* (0.509 contra 0.433), sugiriendo una señal poblacional levemente mayor en LBU. Para *P. nigra* en el sitio DRQ la intercorrelación entre series fue de 0.426. Aunque las cronologías fueron analizadas por separado, al unir las correspondientes a *P. affinis* (LBU y DAG) la intercorrelación entre series fue de 0.426, sugiriendo la presencia de una señal regional para esta especie.

### Eventos Extremos

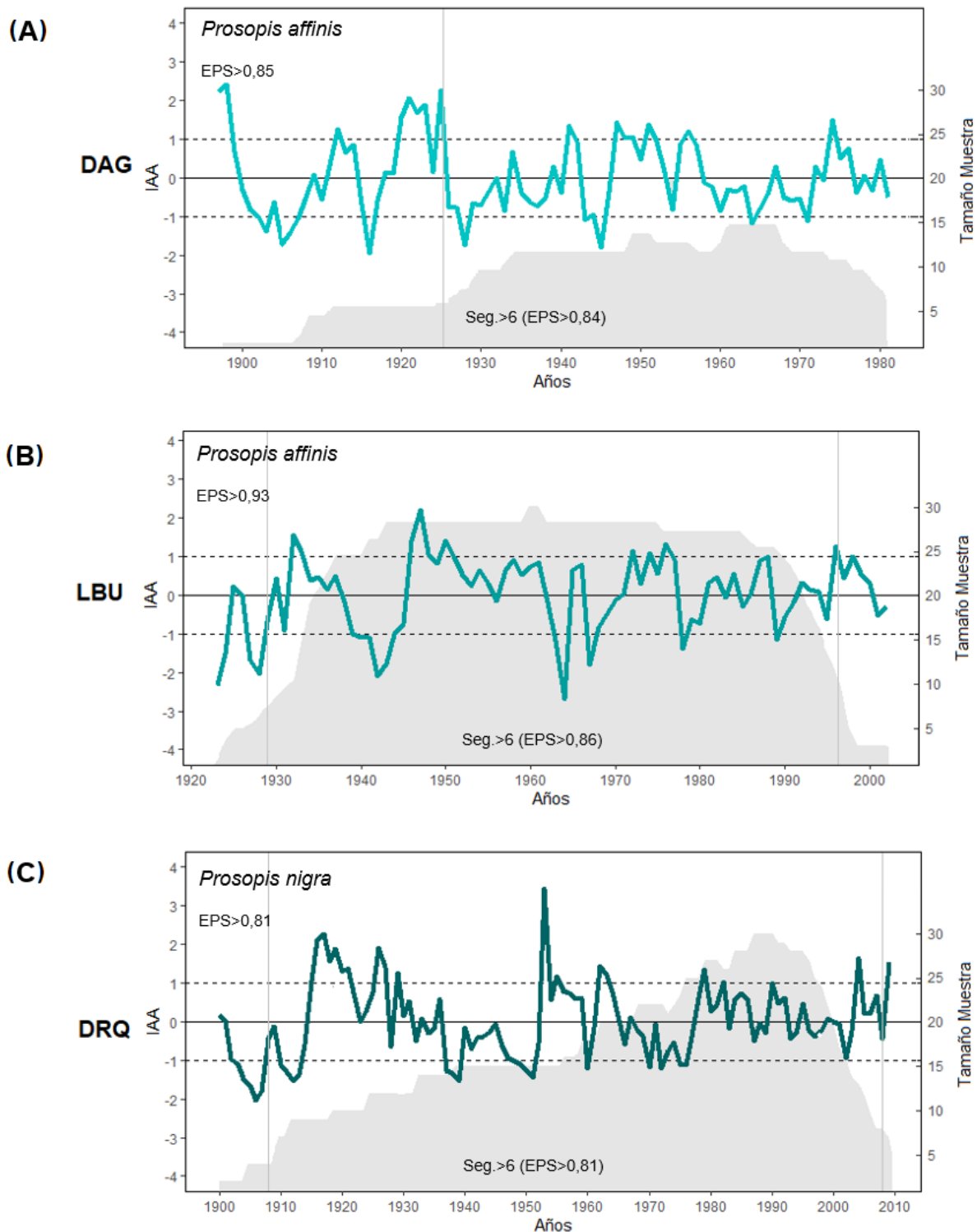
Las cronologías detectaron algunos eventos extremos históricos (anomalía >1,-1), como las sequías de 2009 en el sitio DRQ; la sequía de 1916-17 en los sitios DAG y DRQ, respectivamente, la sequía de 1942-43 y la de 1964-65 en los sitios DAG y LBU, la sequía de 1988-89 en el sitio LBU y la sequía de 2009 en el sitio DRQ (SINAE MIDES 2020) (Fig. 5). Las cronologías muestran otras anomalías significativas, marcadas por anillos angostos (anomalía >-1) y anchos (anomalía >1) (Anexo: Tabla 5).



**Figura 5.** Anomalías en las cronologías de índice de ancho de anillo y sequías históricas en Uruguay (marcadas en rojo).

**Tabla 2.** Datos de las cronologías de ancho de anillo, incluyendo sitio, n° de árboles, n° de series, años, sensibilidad media, correlación entre series (r), señal poblacional expresada (EPS) y años con n° de series > 6.

| Sitio | Árboles | Series | Años            | Sens. M. | Corr. Interserie | EPS   | Años (N>6)      |
|-------|---------|--------|-----------------|----------|------------------|-------|-----------------|
| DAG   | 9       | 15     | 1897-1981 (85)  | 0,352    | 0,433            | >0,85 | 1925-1981 (57)  |
| LBU   | 16      | 31     | 1923-2002 (80)  | 0,334    | 0,509            | >0,93 | 1929-1997 (69)  |
| DRQ   | 17      | 32     | 1900-2009 (110) | 0,339    | 0,426            | >0,81 | 1908-2008 (101) |



**Figura 6.** Cronologías estándar de anomalías en el ancho de anillo de *Prosopis* L. en el litoral oeste de Uruguay. Se indica el Índice de Ancho de Anillo (IAA) (línea coloreada, eje izquierdo), la especie de estudio, el tamaño de la muestra (n° de series) (histograma gris, eje derecha), el EPS de la cronología completa y el EPS de la cronología con número de series >6, indicado por una línea vertical.

### 3.2. Relación crecimiento - clima.

Las características de cada cronología, incluyendo el número de árboles, número de series, años que abarcan, la sensibilidad media, la correlación interserie y el EPS pueden observarse en la Tabla 3. Se probó la correlación de la cronología entera y con un n° de series mayor a 6 para comprobar cual presentaba correlaciones más altas con el clima, seleccionando para el sitio DAG la cronología entera, mientras que para el sitio LBU y DRQ fue seleccionada la cronología de n° de series mayor a 6 (Tabla 3).

**Tabla 3.** Datos de las cronologías de ancho de anillo utilizadas para comparación con clima, incluyendo n° de árboles, n° de series, años, sensibilidad media, correlación entre series y EPS.

| Sitio | Árb. | Series | Años            | Sens. M. | Corr. interserie | EPS   |
|-------|------|--------|-----------------|----------|------------------|-------|
| DAG   | 9    | 15     | 1897-1981 (85)  | 0,352    | 0,433            | >0,85 |
| LBU   | 16   | 31     | 1929-1997 (69)  | 0,334    | 0,518            | >0,86 |
| DRQ   | 17   | 32     | 1908-2008 (101) | 0,339    | 0,430            | >0,81 |

La comparación de cada cronología con el clima del norte de Uruguay obtenida del punto CRU más cercano obtuvo los siguientes valores:

#### Precipitación

Para *P. affinis*, la precipitación acumulada al inicio de la temporada de crecimiento (Agosto) se correlacionó positivamente con el crecimiento en el sitio DAG ( $r=0,39$ ,  $p<0,01$ ; Fig. 7). La precipitación acumulada del verano temprano (Diciembre-Enero) se correlacionó de forma positiva con el ancho de anillo LBU ( $r=0,38$ ,  $p<0,01$ ; Fig. 8). Para esta especie en estos sitios, los anillos de crecimiento de mayor ancho se formaron durante inicios de la temporada de crecimiento lluviosos (Agosto) (DAG) y veranos (Diciembre-Enero) (LBU) lluviosos.

Para *P. nigra* en el sitio DRQ, la precipitación acumulada a fines del invierno e inicio de la temporada de crecimiento (Julio-Agosto) se correlacionó de forma negativa con el crecimiento ( $r=-0,31$ ,  $p<0,05$ ; Fig. 9). En el caso de *P. nigra*, lluvias abundantes a inicios de la temporada de crecimiento se asociaron con la formación de anillos de menor ancho.

#### Temperatura

Para *P. affinis*, en el sitio DAG la temperatura media al inicio de la primavera (Septiembre-October) durante la temporada de crecimiento se correlacionó negativamente con el ancho de anillo ( $r=-0,29$ ,  $p<0,01$ ; Fig. 7). En el caso de LBU la temperatura media promedio del verano (Diciembre-Enero-Febrero) de la temporada de crecimiento se correlacionó negativamente con el ancho de anillo ( $r=-0,39$ ,  $p<0,01$ ; Fig. 8). Para esta especie, los anillos de crecimiento de menor tamaño se formaron durante primaveras (Septiembre-October)(DAG) y veranos (Diciembre-Enero-Febrero) (LBU) cálidos.

Para *P. nigra* en el sitio DRQ, la temperatura media promedio a fines de invierno e inicios de la primavera (Agosto-Septiembre) al inicio de la temporada de crecimiento se correlacionó positivamente con el ancho de anillo ( $r=0,23$ ,  $p<0,05$ ; Fig. 9). En el caso de *P. nigra*, temperaturas altas a inicios de la temporada de crecimiento (Agosto-Septiembre) coincidieron con la formación de anillos de mayor ancho.

### **Índice Estandarizado de Precipitación-Evaporación (SPEI)**

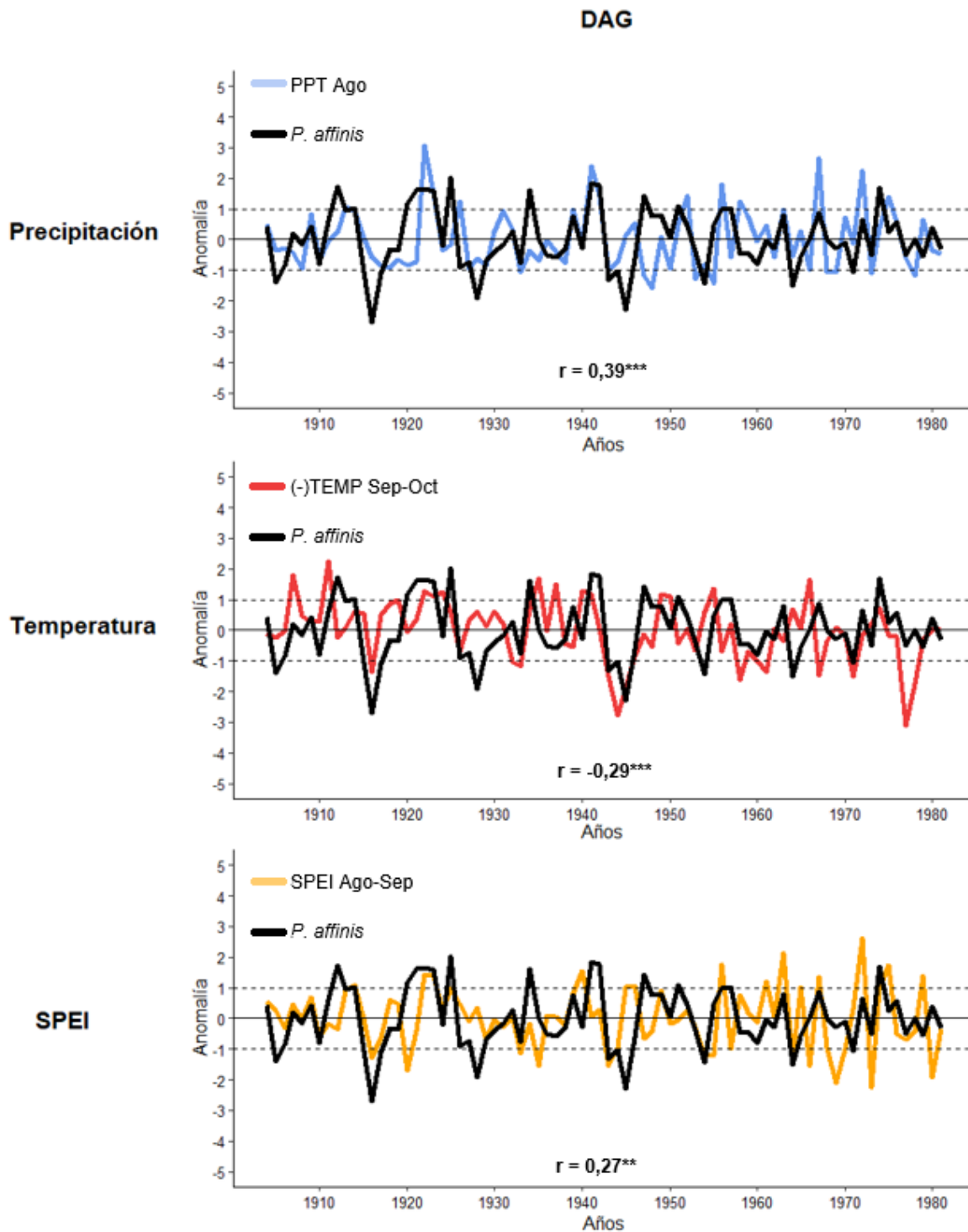
Para *P. affinis*, en el sitio DAG el índice SPEI promedio a fines del invierno e inicios de la primavera (Agosto-Septiembre) se correlacionó positivamente con el ancho de anillo ( $r=0,27$ ,  $p<0,05$ ; Fig. 7), mientras que en el sitio LBU donde SPEI promedio correlacionó positivamente con el ancho de anillo a inicios del verano (Diciembre-Enero) ( $r=0,42$ ,  $p<0,01$ ; Fig. 8). La influencia de primaveras (Agosto-Septiembre) (DAG) y veranos (Diciembre-Enero) (LBU) con altos niveles de humedad (baja sequía) favorecieron la formación de anillos de mayor tamaño.

Para *P. nigra* en el sitio DRQ, SPEI promedio al fines del invierno e inicio de la temporada de crecimiento (Julio-Agosto), se correlacionó negativamente con el ancho de anillo ( $r=-0,31$ ,  $p<0,05$ , Fig. 9). La influencia de altos niveles de humedad (baja sequía) a fines del invierno el inicio de la temporada de crecimiento (Julio-Agosto) influyó en la formación de anillos de crecimiento de menor tamaño.

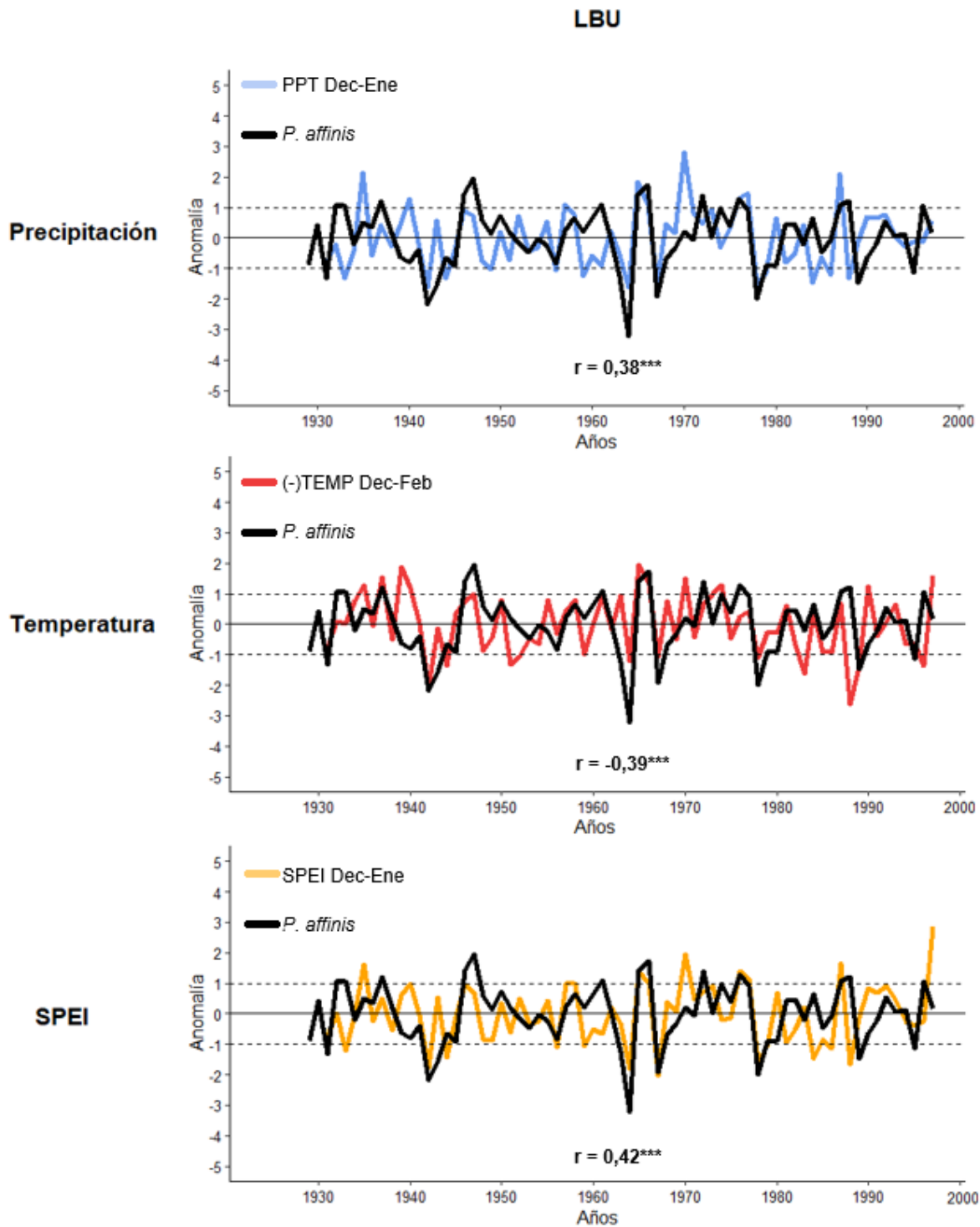
En el caso de *P. affinis*, SPEI y la precipitación local muestran valores similares de correlación con el crecimiento al inicio de la temporada de crecimiento (DAG) ( $r=0,36$ ,  $p<0,05$ ;  $r=0,39$ ,  $p<0,01$ , respectivamente) y durante el verano (LBU) ( $r=0,42$ ,  $p<0,01$ ;  $r=0,38$ ,  $p<0,01$ , respectivamente), mientras que SPEI y la temperatura media muestran valores opuestos de correlación con el crecimiento en verano (DAG) ( $r=0,36$ ,  $p<0,05$ ;  $r=-0,29$ ,  $p<0,01$ , respectivamente) y al inicio de la temporada de crecimiento ( $r=0,42$ ,  $p<0,01$ ;  $r=-0,39$ ,  $p<0,01$ , respectivamente).

Por otro lado en *P. nigra* (DRQ), SPEI y la precipitación muestran valores similares de correlación con el crecimiento a fines del invierno e inicio de la temporada de crecimiento ( $r=-0,31$ ,  $p<0,05$ ;  $r=-0,31$ ,  $p<0,05$ , respectivamente), mientras que SPEI y la temperatura media muestran valores opuestos de correlación con el crecimiento al inicio de la temporada de crecimiento ( $r=-0,31$ ,  $p<0,05$ ;  $r=0,23$ ,  $p<0,05$ , respectivamente).

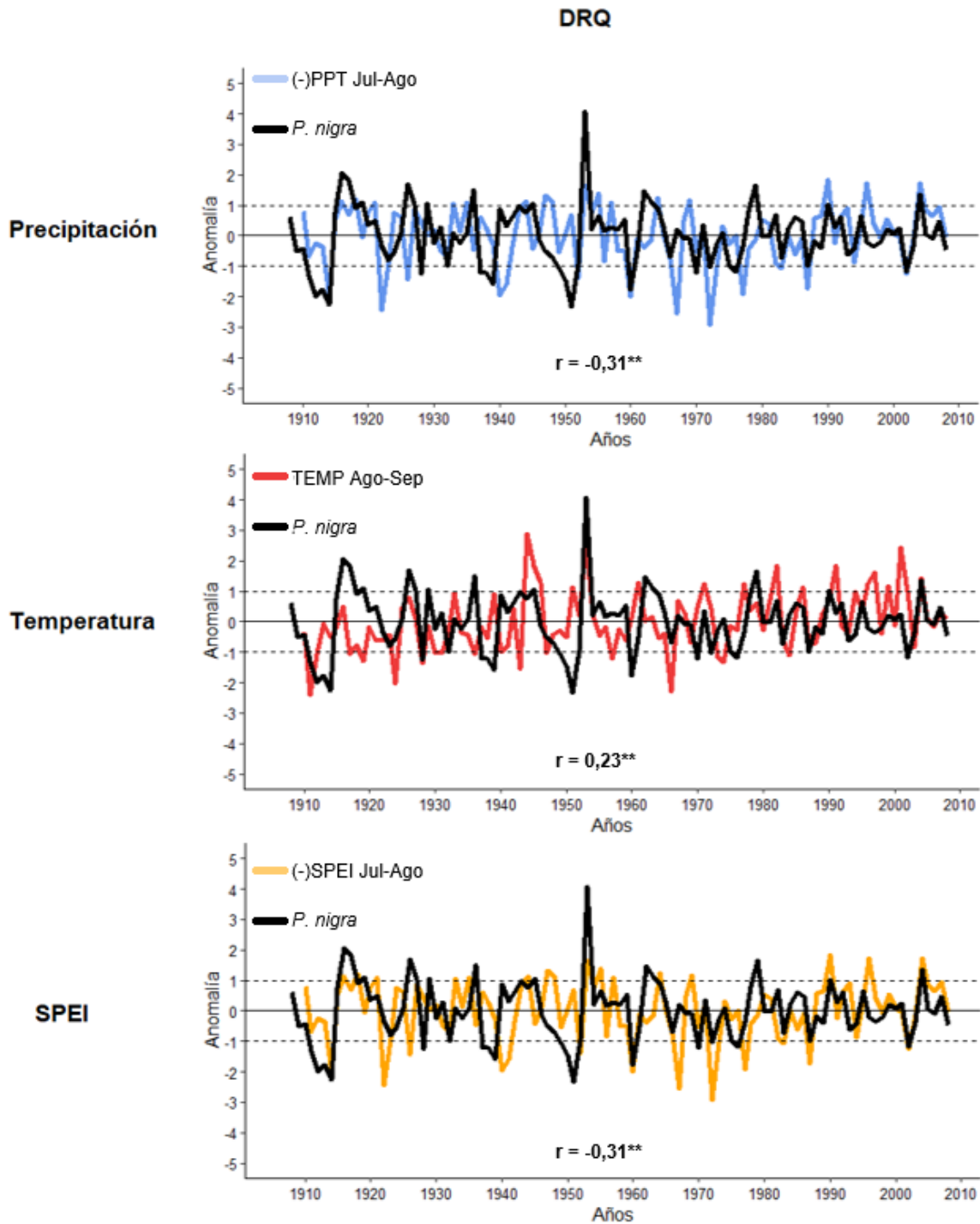
El análisis espacial de la relación entre el crecimiento y el clima a escala regional indica que los árboles de cada sitio reflejan patrones en la precipitación, temperatura y sequía en diferentes áreas del Sureste de América del Sur (SEAS). La extensión espacial de las correlaciones de cada sitio muestran que las cronologías de los sitios DAG y LBU presentan correlaciones más altas que el sitio DQR para estas variables (Fig. 10).



**Figura 7.** Correlaciones entre la variación en el crecimiento de *P. affinis* en el sitio DAG y las anomalías en la precipitación, la temperatura y el Índice Estandarizado de Precipitación-Evapotranspiración (SPEI) Se indica si la variable fué invertida (-), los meses de correlación, y la correlación  $r$  (\*  $p < 0.01$ , \*\*  $p < 0.01$ , \*\*\*  $p < 0.001$ ).

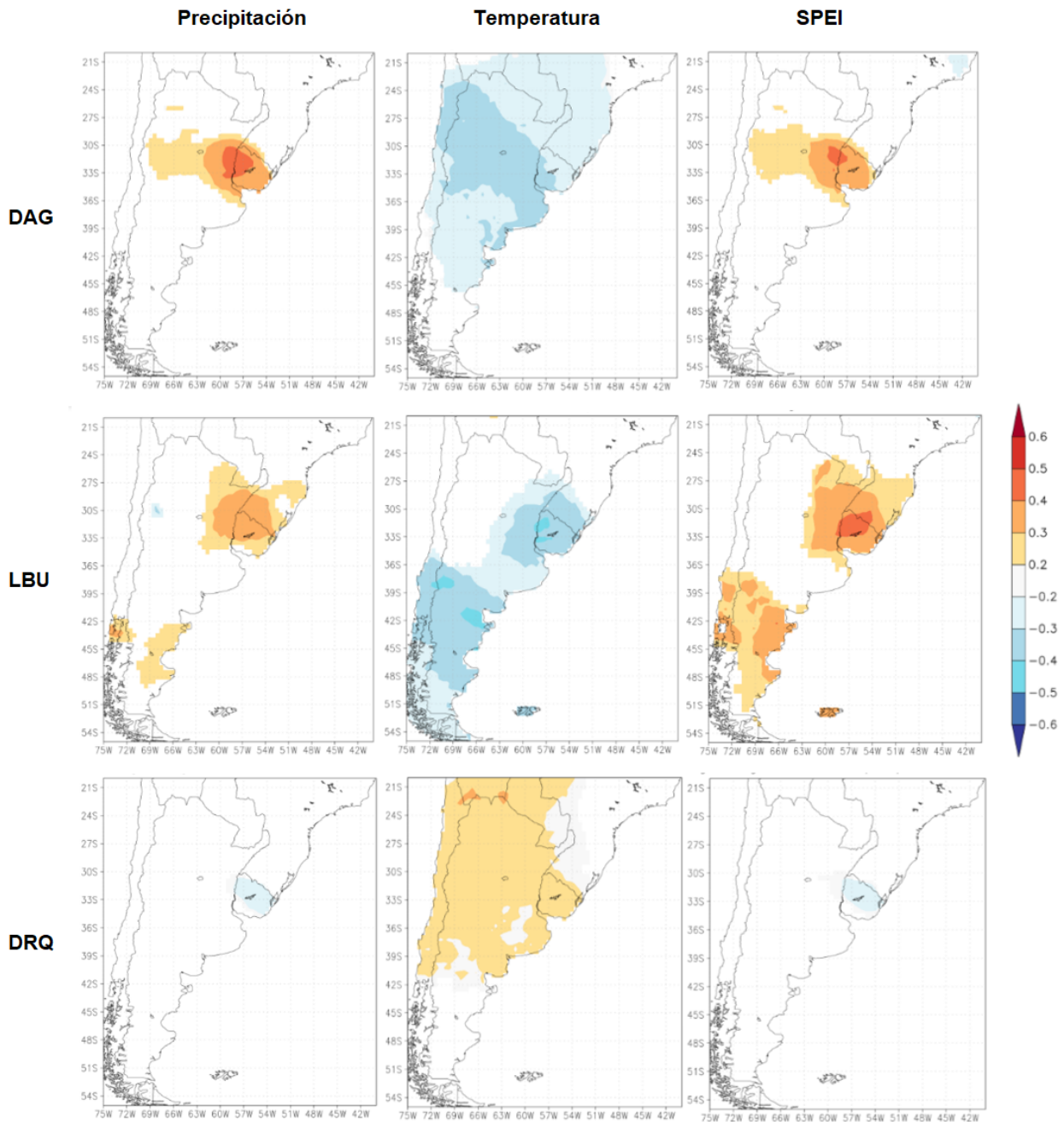


**Figura 8.** Correlaciones entre la anomalía del ancho de anillo de *P. affinis* en el sitio LBU y las anomalías en la precipitación, la temperatura y el Índice Estandarizado de Precipitación-Evapotranspiración (SPEI). Se indica si la variable fué invertida (-), los meses de correlación, y la correlación  $r$  (\*  $p < 0.01$ , \*\*  $p < 0.01$ , \*\*\*  $p < 0.001$ ).



**Figura 9.** Correlaciones entre la anomalía del ancho de anillo de *P. nigra* en el sitio DRQ y las anomalías en la precipitación, la temperatura y el Índice Estandarizado de Precipitación-Evapotranspiración (SPEI). Se indica si la variable fué invertida (-), los meses de correlación, y la correlación  $r$  (\*  $p < 0.01$ , \*\*  $p < 0.01$ , \*\*\*  $p < 0.001$ ).





**Figura 10.** Mapa del sureste de América del Sur mostrando la extensión espacial de la correlación entre las cronologías de ancho de anillo de *P. affinis* (DAG, LBU) y *P. nigra* (DRQ) con la precipitación, temperatura e índice de sequía SPEI a escala regional. Mapas desarrolladas en KMNI Climate Explorer.



### **Índice Sudamericano de Sequía (South American Drought Index (SADA))**

Únicamente *P. affinis* en el sitio LBU correlacionó positivamente con el índice Sudamericano de Sequía (South American Drought Index (SADA)), un índice de sequía de verano (Diciembre-Febrero) ( $r=0,29$ ,  $p<0,05$ ; Fig.12).

### **Humedad del suelo 0-40 cm (Soil Moisture(FLDAS))**

Las cronologías fueron comparadas con el índice de Humedad en Suelo entre 0-40 cm (FLDAS Soil Moisture) tomado entre 1982-2018; sólo *P. affinis* en el sitio LBU presentó una correlación positiva con el mismo en los mes de octubre ( $r=0,26$ ,  $p<0,05$ ; Fig. 12).

### **El Niño Oscilación Sur (ENOS)**

La variabilidad ENSO se relacionó levemente con el crecimiento anual de *P. affinis* (DAG) y *P. nigra* (DRQ), pero no con la precipitación de cada sitio. En el caso del sitio DAG, años La Niña fueron negativamente correlacionados con el crecimiento en Mayo-Junio-Julio del año anterior ( $r=-0,28$ ,  $p<0,05$ ; Fig. 11), en el sitio DRQ años La Niña fueron positivamente correlacionados con el crecimiento en Agosto-Setiembre dos años previo al crecimiento ( $r=0,19$ ,  $p<0,1$ ; Fig. 13). El sitio LBU no mostró correlaciones significativas con este fenómeno.

### **Modo Anular del Sur (SAM)**

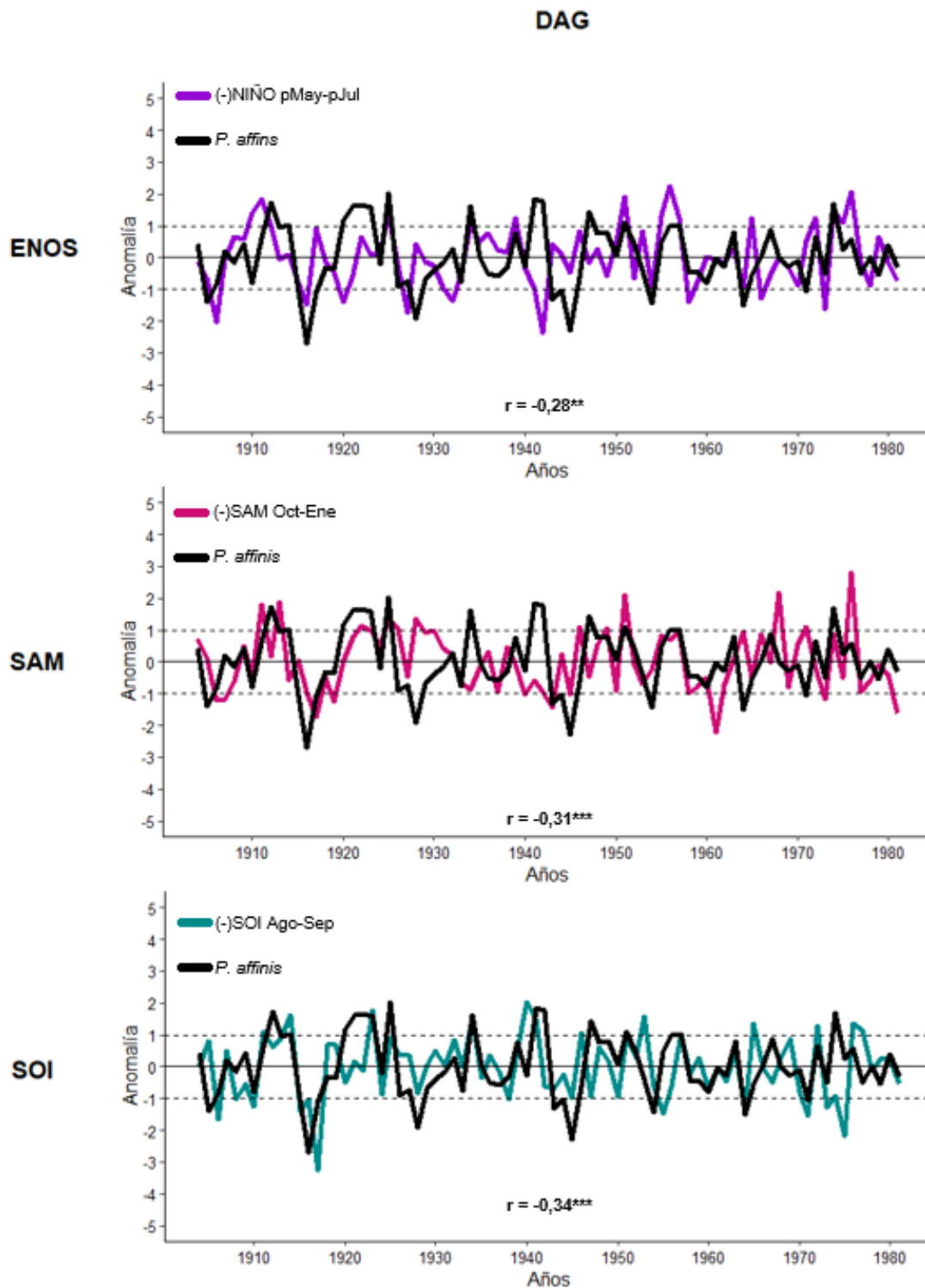
Por otro lado, probamos la correlación entre el Modo Anular del Sur (SAM) y el crecimiento anual. Para *P. affinis*, el sitio DAG mostró una correlación negativa con el crecimiento en los meses de Octubre-Noviembre-Diciembre-Enero ( $r=-0,31$ ,  $p<0,01$ ; Fig. 11); mientras que el sitio LBU mostró una correlación positiva en el mes de Febrero durante la temporada de crecimiento ( $r=0,30$ ,  $p<0,05$ ; Fig. 12), siendo el único sitio donde SAM presenta valores similares a los obtenidos al correlacionar la precipitación con el crecimiento durante el verano ( $r=0,38$ ,  $p<0,01$ ).

Para *P. nigra*, el sitio DRQ mostró una correlación positiva con SAM, durante Diciembre del año anterior ( $r=0,26$ ,  $p<0,05$ ; Fig. 13).

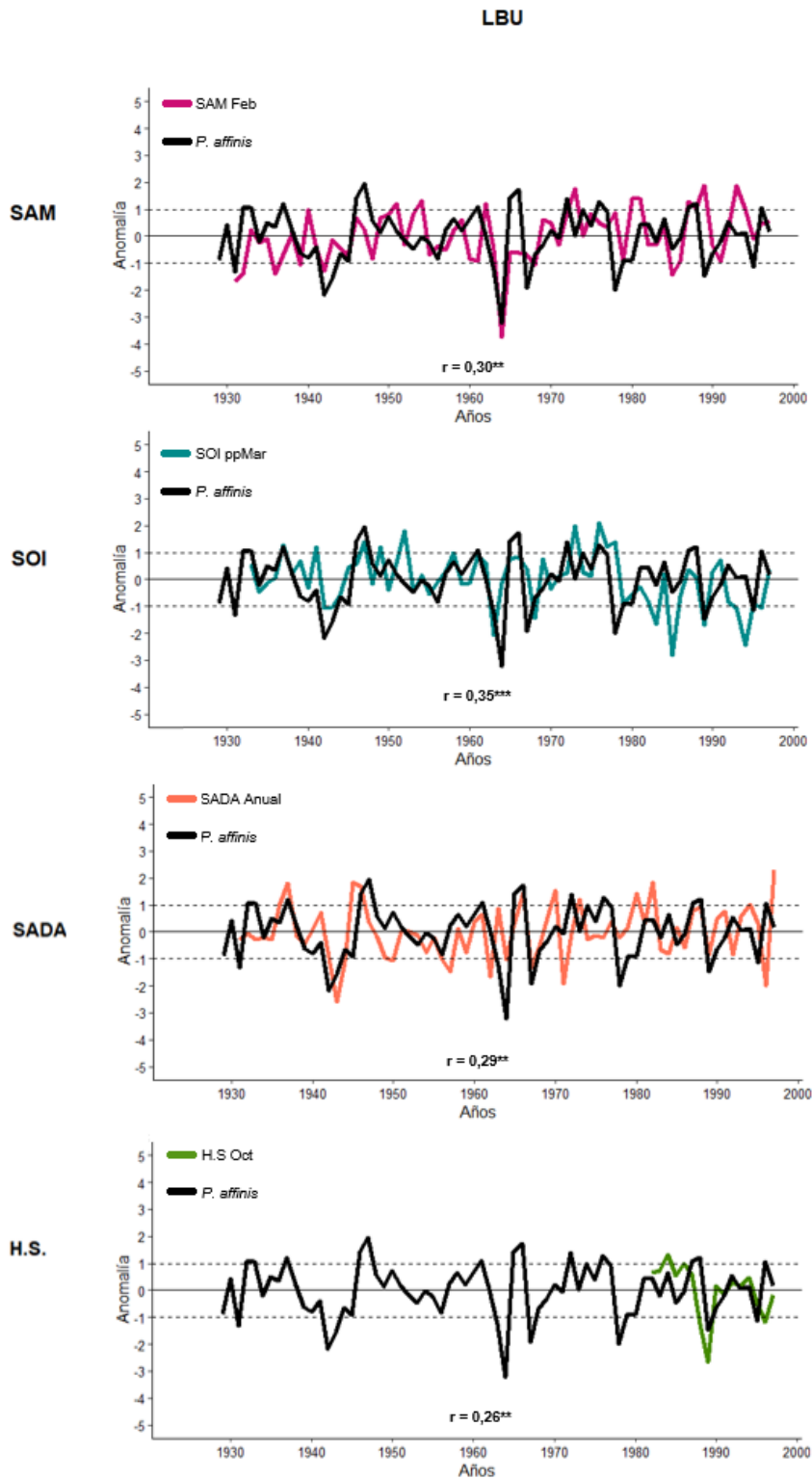
### **Índice de Oscilación Sur (SOI)**

Al comparar las cronologías de ancho de anillo con el índice de Oscilación del Sur (SOI), en el sitio DAG se encontró una correlación negativa con el crecimiento en los meses de Agosto-Setiembre ( $r=-0,34$ ,  $p<0,01$ ; Fig. 11); en el sitio LBU la correlación fue positiva durante Marzo dos años previos al crecimiento ( $r=0,35$ ,  $p<0,01$ ; Fig. 12)

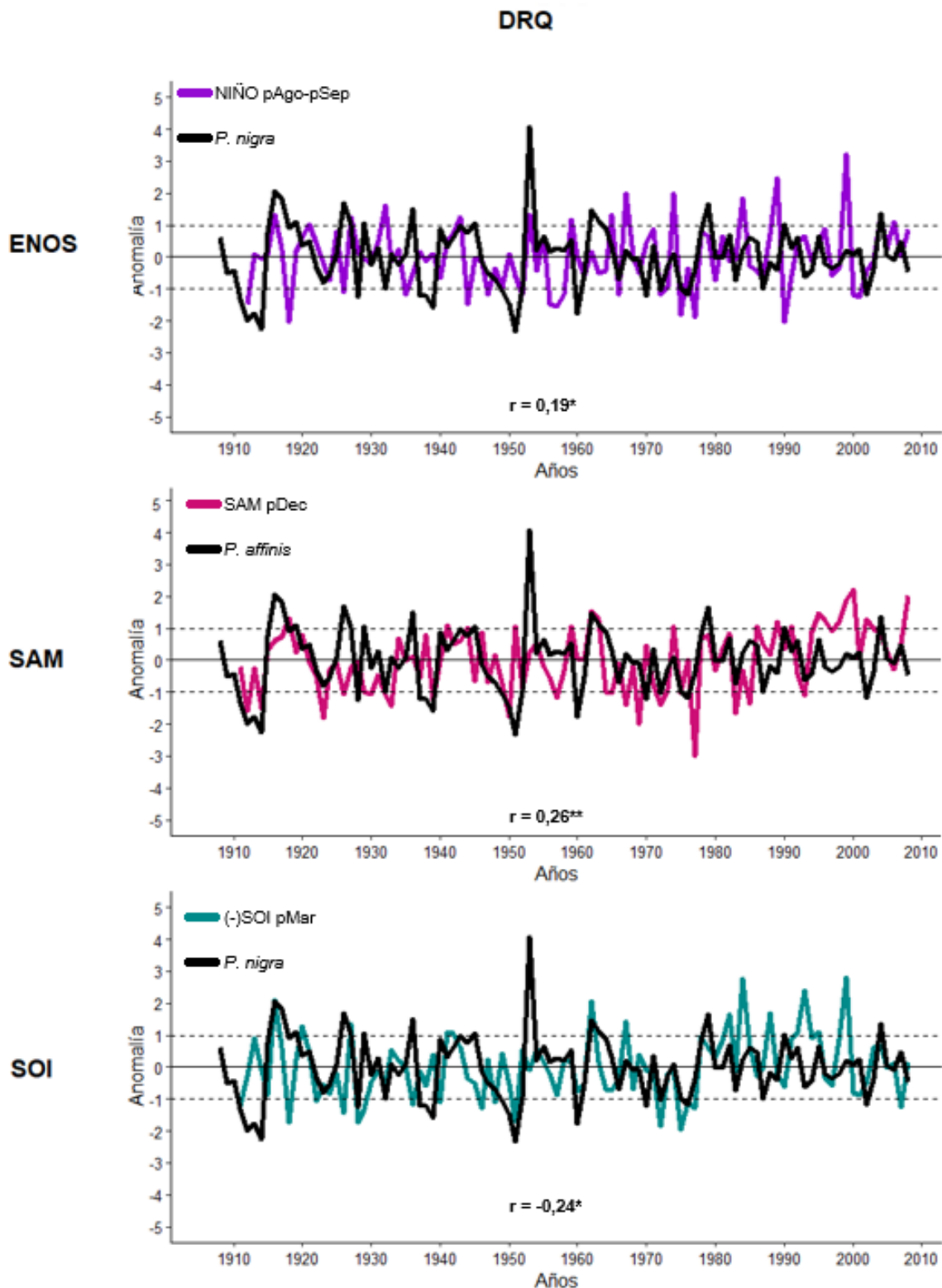
En el sitio DRQ la correlación entre SOI y el crecimiento fué negativa para Marzo del anterior al crecimiento ( $r=-0,24$ ,  $p<0,1$ ; Fig. 13). En ningún caso SOI fue relacionado con la precipitación.



**Figura 11.** Correlaciones entre la variación en el crecimiento de *P. affinis* en el sitio DAG y las anomalías en el índice El Niño Oscilación Sur (ENOS), el Modo Anular del Sur (SAM) y el Índice de Oscilación Sur (SOI). Se indica si la variable fué invertida (-), los meses de correlación, y la correlación  $r$  (\*  $p < 0.01$ , \*\*  $p < 0.01$ , \*\*\*  $p < 0.001$ ).



**Figura 12.** Correlaciones entre la variación en el crecimiento de *P. affinis* en el sitio LBU y las anomalías en el índice El Niño Oscilación Sur (ENOS), el Modo Anular del Sur (SAM), el Índice de Oscilación Sur (SOI), el índice reconstruido de Sequías de Sudamérica (South America Drought Index (SADA)) de verano (Diciembre-Febrero) y el índice de Humedad del Suelo 0-40 cm (Soil Moisture(FLDAS)). Se indica si la variable fué invertida (-), los meses de correlación, y la correlación  $r$  (\*  $p < 0.01$ , \*\*  $p < 0.0,1$  \*\*\* $p < 0.001$ ).



**Figura 13.** Correlaciones entre la variación en el crecimiento de *P. nigra* en el sitio DRQ y las anomalías en el índice El Niño Oscilación Sur (ENOS), el Modo Anular del Sur (SAM) y el Índice de Oscilación Sur (SOI). Se indica si la variable fué invertida (-), los meses de correlación, y la correlación  $r$  (\*  $p < 0.01$ , \*\*  $p < 0.01$ , \*\*\*  $p < 0.001$ ).

**Tabla 4.** Resumen de las correlaciones (\* p<0.01, \*\* p<0.0,1 \*\*\*p<0.001) entre la variación en el crecimiento de *Prosopis* L. y las anomalías en las variables climáticas Precipitación (PPT), Temperatura (Temp), el Índice Estandarizado de Precipitación-Evapotranspiración (SPEI), el Índice Sudamericano de Sequías (SADA), el índice El Niño Oscilación Sur (ENOS), el Modo Anular del Sur (SAM), el Índice de Oscilación Sur (SOI) y la Humedad del Suelo 0-40 cm (H.S). para los sitios de estudio en el norte de Uruguay.

| Sitio | Sp.               | PPT                | Temp                | SPEI               | SADA              | ENOS                 | SAM                     | SOI                 | H. S.         |
|-------|-------------------|--------------------|---------------------|--------------------|-------------------|----------------------|-------------------------|---------------------|---------------|
| DAG   | <i>P. affinis</i> | 0,39***<br>Ago     | -0,29***<br>Sep-Oct | 0,27**<br>Ago-Sep  | -                 | -0,28**<br>pMay-pJul | -0,31**<br>*<br>Oct-Ene | -0,34***<br>Ago-Sep |               |
| LBU   | <i>P. affinis</i> | 0,38***<br>Dec-Ene | -0,39***<br>Dec-Feb | 0,42***<br>Dec-Ene | 0,29**<br>Dec-Feb | -                    | 0,30**<br>Feb           | 0,35***<br>ppMar    | 0,26**<br>Oct |
| DRQ   | <i>P. nigra</i>   | -0,31**<br>Jul-Ago | 0,23**<br>Ago-Sep   | -0,31**<br>Jul-Ago | -                 | 0,19*<br>pAgo-pSep   | 0,26**<br>pDec          | -0,24***<br>pMar    |               |

#### 4. Discusión

Los resultados de este trabajo reflejan el potencial dendrocronológico del género *Prosopis* en Uruguay, con una señal poblacional expresada (Expressed Population Signal (EPS)) >0,80 para los tres sitios, encontrándose entre las pocas cronologías de ancho de anillo disponibles para el sureste de América del Sur. Estas cronologías fueron datadas con dos especies de árboles nativos, demostrando la conexión entre el crecimiento anual de estos árboles y variables climáticas locales y globales. Entre las variables, se destaca la relación de la variabilidad en las precipitaciones en correlación con las anomalías en el ancho de anillo anual. En segundo lugar se presenta la temperatura como un factor que regula la disponibilidad de agua a través de la evapotranspiración (Boninsegna et al. 2009). Un posible factor que influencia las diferencias en la respuesta del crecimiento frente a la variabilidad climática encontradas entre sitios podría ser las características de cada especie (*P. affinis* vs. *P. nigra*), aunque parece más probable que se deba a las características topográficas de los sitios donde se encuentra cada especie (*P. nigra* sólo habita suelos halomórficos, en esta investigación fué muestreada en sitios con alta influencia del río, *P. affinis* habita diversos tipos de suelo, en esta investigación fué muestreada en sitios con alta influencia de sabanas arboladas).

##### 4.1. Anillos de crecimiento anual en *Prosopis*

Los límites de los anillos de crecimiento en ambas especies se caracterizaron por una fina banda de parénquima terminal (Fig. 4), al igual que en muchas angiospermas subtropicales en América del Sur (Lisi et al. 2008; Ramirez & del Valle 2011; Ferrero et al. 2014) y que muchas otras especies estudiadas del género (Villalba et al. 2000). Dentro de cada anillo, la porosidad fué semidifusa, con vasos de mayor tamaño ubicados sobre la línea de parénquima terminal seguidos de vasos de menor tamaño. Otras

especies del género *Prosopis* en América del Sur también disponen de anillos de crecimiento anual con porosidad semidifusa separados por una fina línea de parénquima terminal (Villalba et al. 2000).

La presencia de anillos falsos, conocidos como zonas de crecimiento intra anual en especies tropicales, fueron relativamente comunes en *P. affinis* y *P. nigra* y potencialmente relacionados a períodos cálidos durante los meses de invierno. Los mismos fueron identificados por diferencias en el ancho de anillo y su anatomía, así como comprobando la continuidad del anillo alrededor del disco. Los anillos falsos representan un problema común en muchas especies que crecen en climas tropicales y subtropicales (Worbes 2002; Oliveira et al. 2009; Groenendijk et al. 2015). Por esta razón, sumada a la naturaleza densa de la madera (900 Kg/m<sup>3</sup> seca) (INTI-CITEMA, 2003), esta especie no es la más indicada para realizar muestreos con taladros de incremento en la región.

El carácter anual de los anillos de crecimiento es sugerido por la posibilidad de realizar datación cruzada entre las series y por la correlación de las cronologías con los datos climáticos (Stahle 1999). La variabilidad estacional en la actividad del cambium para árboles nativos es desconocida en Uruguay; más investigaciones deben ser realizadas para determinar el momento del crecimiento cambial en especies nativas de esta región.

#### **4.2. Calidad de la Cronología**

Uno de los desafíos de este trabajo fue la obtención de muestras de rodajas enteras de *Prosopis*, siendo la madera muerta la fuente más abundante de material. El número de árboles muestreados por sitio fué comparable con el usado en otros estudios (Carevic et al. 2017; Piraino et al. 2017; Salazar et al. 2018), a excepción del sitio DAG donde el número de muestras fue relativamente bajo, si bien significativo (N°=9). La obtención de muestras vivas se vió dificultada, ya que con el fin de obtener discos enteros es necesario talar al individuo muestreado, acción no deseable en sabanas arboladas de planicie (bosques parque) altamente reducidos, dado su estado actual de conservación (MGAP et al. 2018). La alta densidad de la madera (900 Kg/m<sup>3</sup> seca (INTI-CITEMA 2003)) impidió el muestreo de individuos vivos a través del uso de taladros de incremento, rompiéndose la herramienta en todas las ocasiones que se intentó tomar muestras de esta manera (Lucas com. pers.), procedimiento de todas formas no recomendado en especies con alta presencia de anillos falsos (Villalba et al. 2000).

El carácter flotante de las cronologías, sin incluir muestras de individuos vivos que anclan la misma al presente, presentó una dificultad a la hora de datar los anillos de crecimiento. Esto podría resolverse con estudios de C14 que especifiquen el año de formación de los anillos (Pacheco-Solana et al. 2021). Lamentablemente, no fue una opción en este trabajo debido al tiempo requerido para la extracción de celulosa y la necesidad de enviar muestras al exterior para realizar estos estudios. Las cronologías pudieron ser datadas en base a la presencia de anillos particularmente angostos y anchos, y comparándolos con el registro de sequías e inundaciones de nuestro país (SINAE MIDES 2020), apoyado por la comparación con cronologías en el género realizadas en la región (Bogino et al. 2011; Morales et al. 2004, 2012; Risio et al. 2018), información de los propietarios de los campos donde se obtuvieron las muestras, que conocían el año de tala de varias muestras y la datación cruzada realizada entre los segmentos de cada sitio. Al comparar las cronologías flotantes con los datos climáticos locales

(precipitación, temperatura, SPEI), se probaron cronologías +/- 10 años desde la fecha estipulada, mostrando una clara influencia de estas variables en el año calendario de la temporada de crecimiento de las muestras.

Las cronologías arrojaron valores EPS, de correlación interserie y de sensibilidad significativos. Los valores EPS son relativamente bajos ( $>0,81$ ), pero comparables con otras cronologías en angiospermas y gimnospermas tropicales y subtropicales, sugiriendo que una alta variabilidad interanual (EPS) entre los anillos es común en estas regiones (Baker et al. 2008; Battipaglia et al. 2015; López & Villalba 2016). El valor EPS puede deberse a que las muestras por sitio presentan orígenes distintos, en algunos casos proviniendo de postes de campo manufacturados años atrás, de muestras taladas en distintos momentos o árboles muertos en pie. Este valor EPS podría aumentar muestreando una población de árboles provenientes de la misma zona y talados en un mismo momento. La cronología con mayor valor EPS fue la del sitio LBU ( $>0,93$ ), donde la mayoría de las muestras corresponden a una única tala realizada en torno al año 2001, reflejando una cohorte de árboles que vivieron al mismo tiempo bajo condiciones similares. A esta le sigue la cronología del sitio DAG ( $>0,85$ ) y finalmente el sitio DRQ ( $>0,81$ ), donde las muestras provienen de fuentes más variadas (Tabla 2). Sumado a esto el sitio DRQ se caracterizó por poseer parches aislados con individuos de *P. nigra* y gran influencia del bosque latifoliado de planicie vargedícola (bosque ribereño), pudiendo esto también afectar el valor EPS.

La correlación interserie de todos los sitios fué relativamente alta. El sitio con mayor valor de interrelación entre series fue LBU (0,509), seguido por DAG (0,433) y finalmente DRQ (0,426), siguiendo las tendencias del valor EPS. La sensibilidad de las cronologías fue alta, demostrando que las mismas responden a cambios en las variables climáticas anuales y reflejando una baja correlación interanual entre los anillos. El sitio con la sensibilidad mayor fue DAG (0,352), seguido por DRQ (0,339) y finalmente LBU (0,334), sugiriendo una señal poblacional levemente mayor en DAG influenciada por el menor número de árboles muestreados (9).

Es importante reflejar que las tendencias en el crecimiento de estos árboles se encuentran potencialmente influenciadas por la actividad humana. Los bosques nativos en Uruguay han sido históricamente impactados por la adquisición de leña, el pastoreo y la agricultura (Gautreau 2010; MGAP et al. 2018; INIA 2022), pudiendo las oscilaciones a largo plazo en los patrones de crecimiento reflejar ciclos de poda y rebrote, ocultando la respuesta a la variabilidad climática.

Un spline de suavizado cúbico de 32 años fue utilizado en estas cronologías con el fin de remover estas tendencias posiblemente antrópicas en el crecimiento.

Futuros estudios que investiguen otras especies longevas en Uruguay podrán dilucidar si las dificultades encontradas en *Prosopis* son comunes entre otras especies de la sabana arbolada de planicie (bosque parque).

### **4.3. Crecimiento en árboles y clima**

Las correlaciones observadas entre el crecimiento de los árboles y las variables climáticas estudiadas representan valiosa información para entender la respuesta de los bosques al clima en Uruguay. En este

trabajo observamos una clara influencia de la disponibilidad de agua en el crecimiento, con valores de correlación con el índice de sequía (SPEI) altos, mostrando la importancia del balance entre las precipitaciones y la evapotranspiración asociada a las temperaturas.

### **Precipitación y Temperatura**

Encontramos dos casos opuestos en las relaciones crecimiento-clima de los sitios analizados. En los sitios DAG y LBU, el ancho de los anillos de crecimiento se explica principalmente por las precipitaciones que ocurren al inicio y durante la temporada de crecimiento, a fines del invierno, durante la primavera y el verano (Agosto, Diciembre-Enero, respectivamente), presentando una correlación positiva con el crecimiento. Mientras que en Uruguay no existe una estación marcada de sequía ni precipitación, las primaveras y veranos (Septiembre-Octubre, Diciembre-Enero-Febrero, respectivamente) con temperaturas cálidas durante el año de crecimiento afectan la disponibilidad de agua a través de la evapotranspiración (Boninsegna et al. 2009) y por tanto reducen la producción de madera, presentando una correlación negativa con el crecimiento.

En el caso de DRQ, al ser un sitio bajo (16 msnm promedio) con áreas inundables del Río Uruguay y con presencia de suelos halomórficos, ocurre lo opuesto, el crecimiento se ve afectado por un aumento en las precipitaciones previo y al inicio de la temporada de crecimiento, a fines del invierno (Julio-Agosto), presentando una correlación negativa con el crecimiento. Por otro lado, se ve beneficiada por temperaturas cálidas a fines del invierno e inicios de la primavera (Agosto-Septiembre) que disminuyen la disponibilidad de agua, contrarrestando el aumento en las precipitaciones, presentando una correlación positiva del aumento de la temperatura con el crecimiento.

Las diferencias observadas en la correlación del crecimiento con la precipitación y temperatura entre los diferentes sitios, pueden explicarse a través de la caracterización topográfica de los sitios (Tabla 1), donde DAG y LBU representan sitios altos (45,5 msnm promedio.) y con suelos con drenaje bueno (DAG) o de inundación rápida y corta (LBU) (CONEAT 2012), mientras que DRQ se encuentra en zonas bajas (16 msnm promedio) muy cercanas al río, en suelos con parches de blanqueales (suelos halomórficos) poco drenables (Fagundez 2015, CONEAT 2012)). Estas características conforman a DAG y LBU como sitios con baja probabilidad de inundación frente a crecidas del río o incrementos en el nivel de aguas subterráneas, mientras que DRQ se presenta como un sitio bajo con áreas inundables. Esto provoca diferencias ante aumentos y disminuciones en la disponibilidad de agua, con el crecimiento anual en DAG y LBU beneficiado por un aumento en las precipitaciones y altos niveles en aguas subterráneas, y DRQ viendo su crecimiento anual disminuido frente a las mismas condiciones, por anegamiento del sitio, provocando falta de oxígeno en raíces y contribuyendo a la salinización. Si a este escenario sumamos la característica freatófita de estas especies, con raíces que pueden alcanzar los 30 m de largo en algunas especies de *Prosopis* (Villagra et al. 2010), la sensibilidad frente a aumentos en las precipitaciones es aún mayor.

Casos similares han sido observados en los algarrobales de la Pampa Argentina (Bogino & Jobbágy 2011), donde los individuos cercanos a fuentes de agua se ven perjudicados frente a un aumento en las precipitaciones, mientras que aquellos en cimas lejanas a fuentes de agua se ven beneficiados frente a este aumento. En todos los casos, el crecimiento se encuentra fuertemente influenciado por la



disponibilidad de agua, con el crecimiento beneficiado ante cierta disponibilidad de agua, pero afectado por la misma variable cuando la disponibilidad es excesiva, produciendo anegamiento de las raíces en sitios bajos. Estos resultados sugieren que la disponibilidad de agua es el principal factor promotor del crecimiento de los árboles en esta región, mientras que la temperatura juega un rol secundario, concordando con estudios previos para esta región (Wagner et al. 2014).

Las correlaciones entre el crecimiento de árboles y las variables climáticas representan una valiosa fuente de información a explotar en nuestro país. En Uruguay el registro nacional de la variabilidad climática histórica es limitado en el interior del país (INUMET), dificultando el análisis de la variabilidad histórica del clima en nuestro país y el pronóstico de escenarios futuros. La información obtenida de proxys climáticos longevos, como pueden ser los anillos de crecimiento anual de árboles, se presenta como una oportunidad para ampliar el conocimiento de la variabilidad climática local. Reconstrucciones climáticas a través de análisis dendrocronológicos han sido exitosamente realizadas en América del Sur (Boninsegna et al. 2009; Ferrero et al. 2015; Humanes-Fuente et al. 2020) y podrían ser llevadas a cabo en Uruguay con la finalidad de fortalecer la información climática histórica, implicando un nuevo servicio ecosistémico aportado por los bosques nativos, como es el uso de árboles longevos como proxy de datos climáticos.

Las cronologías muestran una clara influencia de la precipitación local en el crecimiento de los árboles, pero a diferencia de otras regiones de América del Sur, donde existe una clara estacionalidad en las precipitaciones (Karlín & Díaz 1984; Piraino et al. 2015; Ancajima 2017; Carevic et al. 2017), nuestro país presenta lluvias abundantes durante todo el año (Barreiro et al. 2019), tomando la temperatura un rol clave en la influencia de las precipitaciones en el crecimiento, a través del peso de las tasas de evapotranspiración.

Debido a la baja estacionalidad en el régimen de lluvias, regiones como Uruguay han sido poco estudiadas por la dendrocronología, debido a la dificultad que presenta para el análisis de la influencia de las variables climáticas. Este trabajo demuestra que estudios dendrocronológicos pueden ser llevados a cabo en regiones subtropicales húmedas con éxito, aportando información relevante a la hora de predecir el comportamiento de un sistema frente a la variabilidad climática, herramienta clave en suelos altamente productivos como los del noroeste del país, donde la agricultura y la ganadería es extensiva (INIA 2022).

### **Índices de sequía (SPEI, SADA) y humedad del suelo (0-40 cm FLDAS)**

De forma similar a las correlaciones encontradas para la precipitación y la temperatura, la relación entre las cronologías y el Índice Estandarizado de Precipitación-Evapotranspiración (SPEI) también fue contraria al evaluar los sitios. En DAG y LBU la baja sequía y alta humedad durante el inicio de la temporada de crecimiento y el verano (Agosto-Septiembre, Diciembre-Enero, respectivamente) se correlacionan positivamente con el crecimiento, mientras que en el sitio DRQ, estas mismas condiciones de baja sequía y alta humedad previo y al inicio de la temporada de crecimiento (Julio-Agosto) se correlaciona de forma negativa con el crecimiento.

Al analizar el índice anual reconstruido de Sequías de Sudamérica (South America Drought Atlas (SADA) (SADA) Index) LBU fue el único sitio donde se encontró una correlación, corroborando que este sitio presenta alta sensibilidad a cambios en la disponibilidad de agua en el suelo. Sumado a esto, la cronología del sitio LBU (comprendida entre 1929-1997) fue la única donde se encontró una respuesta al índice de Humedad en Suelo entre 0-40 cm (FLDAS Soil Moisture), con una correlación positiva para la Humedad del mes de Octubre. Este índice presenta datos acotados entre 1982-2018, no pudiendo compararse con la cronología DAG limitada a 1897-1981, pero sí con la cronología DRQ (1908-2008) con la cual no presenta correlaciones, apoyando la teoría de que este es un sitio con suelos húmedos que responde principalmente a otros factores limitantes, como la sequía.

### **Variables climáticas globales (ENOS, SAM, SOI)**

No se encontraron correlaciones fuertes entre el ancho de anillo y las variables climáticas globales. Las cronologías DAG y DRQ mostraron débiles correlaciones con ENSO, mientras que LBU no mostró correlaciones significativas. En los dos primeros sitios, la correlación se dió en el año previo al crecimiento durante los meses de Mayo-Junio-Julio, o dos años previo al crecimiento durante los meses de Agosto-Septiembre, respectivamente. Estos valores no se correlacionan con la variabilidad en las precipitaciones durante los mismos períodos. Estudios previos sobre la relación entre ENSO y la lluvia en Uruguay sugieren que la mayor influencia se da en la primavera (Octubre-Diciembre), con baja influencia en el verano (Enero-Febrero) y débil influencia en el otoño (Marzo-Mayo) (Cazes-Boezio et al. 2003). Las respuestas de las cronologías DAG y DRQ muestran un efecto adelantado o retrasado a estos datos, no logrando un buen registro de este evento.

El forzante climático SAM tuvo una influencia leve sobre la variabilidad en el crecimiento en todos los sitios. Fenómenos climáticos extra tropicales, como en Modo Anular del Sur (SAM) pueden influenciar el crecimiento de los árboles en las latitudes bajas del Hemisferio Sur (Mundo et al. 2012). La fase positiva de SAM se relaciona con bajas precipitaciones en esta región de América del Sur, particularmente durante los meses de otoño (Garreaud et al. 2009). En los sitios estudiados, las correlaciones se dan en primavera y verano del año de crecimiento para DAG, siendo esta correlación negativa, pudiendo indicar bajas precipitaciones y generando la formación de anillos de menor tamaño; para LBU la correlación es positiva y se da durante el mes de Febrero de la temporada de crecimiento coincidiendo con las precipitaciones; en el caso de DRQ la correlación es positiva durante Diciembre del año previo al crecimiento. Estos resultados no son claros y por tanto estas cronologías no serían las más indicadas para predecir este fenómeno.

Esta situación poco esclarecedora se repite al comparar las cronologías con el índice de Oscilación Sur (SOI), el cual presenta valores positivos asociados a eventos La Niña y valores negativos asociados a eventos El Niño. El sitio DAG correlaciona con este índice de forma negativa, pudiendo indicar eventos El Niño que promueven las lluvias y por lo tanto el crecimiento. El sitio LBU correlacionó con el índice de forma positiva durante Marzo dos años previos al crecimiento y el sitio DRQ se correlacionó de forma negativa durante el mismo mes un año previo al crecimiento.

### **Eventos extremos**

Las cronologías detectaron algunos eventos extremos históricos (marcados por anomalías  $>1, -1$ ), como la inundación de 2009 en el sitio DRQ, la sequía de 1916-17 en los sitios DAG y DRQ, respectivamente, la sequía de 1942-43 en los tres sitios, la sequía de 1964-65 en los sitios DAG y LBU, las sequías de 1988-89 en el sitio LBU y la sequía de 2009 en el sitio DRQ (SINAE MIDES 2020). Las cronologías muestran otras anomalías significativas, marcadas por anillos angostos (anomalía  $>-1$ ) y anchos (anomalía  $>1$ ) (Anexo: Tabla 5). Esta respuesta en el crecimiento de los árboles frente a eventos extremos resulta útil para el análisis de eventos extremos históricos en Uruguay, incluido dentro de la Cuenca del Plata, una de las regiones agrícolas más importantes del mundo (Viglizzo & Frank 2006).

## 5. Conclusiones

La investigación dendrocronológica en Uruguay tiene el potencial de fortalecer vacíos en la información sobre la variabilidad climática histórica en nuestra región. Este trabajo provee la primera fuente de datos dendrocronológicos usando el género *Prosopis* en nuestro país y se encuentra entre las pocas disponibles para el sureste de América del Sur.

Se comprobó que las especies *P. affinis* y *P. nigra* forman anillos de crecimiento anual en Uruguay. Se crearon tres cronologías de ancho de anillo para comparar con variables climáticas.

La variabilidad del ancho de anillo estuvo principalmente correlacionada con la disponibilidad de agua y en segundo lugar con la temperatura. Las características topográficas entre los sitios de estudio posiblemente influyeron en la respuesta de las cronologías frente al régimen de precipitaciones, promoviendo el crecimiento en sitios altos y drenables y perjudicándolo en el sitio bajo e inundable con presencia de parches halomórficos. La respuesta diferencial entre sitios también puede estar influenciada por la especie trabajada en cada sitio, aunque es más probable que la diferencia está dada por la preferencia de tipos de suelos de cada especie.

Este trabajo refuerza las investigaciones que demuestran que los árboles pueden producir anillos de crecimiento anuales incluso en climas sin una estación seca o húmeda marcada, presentando correlación entre el crecimiento y la disponibilidad de agua, a través de la influencia de una marcada estacionalidad en la temperatura, que produce variabilidad en el índice de evapotranspiración, modificando los reservorios de agua.

La dendrocronología representa una importante herramienta para el estudio de la variabilidad climática histórica y la respuesta de los bosques frente a la misma; llenar vacíos de información en regiones donde esta herramienta se encuentra poco desarrollada, como el sudeste de América del Sur, apoya la formación de una base de datos más rica y eficiente a la hora de predecir los efectos de la variabilidad climática en formaciones vegetales.

## 6. Agradecimientos

Quisiera agradecer a la Dirección General Forestal (MGAP) y al ex-Director de la División Gestión de Bosques Ing. Agr. Juan Pablo Nebel, el técnico regional de la DGF, Ing. Agr. Agustín Bóffano, como también al Director Regional del Sistema Nacional de Áreas Protegidas del Litoral Norte, Ing. Agr. Francisco Bergós y al ex-Guardaparque Tec. Recursos Naturales Elias Brum, sin quienes no hubiese sido posible la adquisición de muestras en los sitios de colecta.

Agradecemos a los propietarios de los campos, los Srs. Arburua y Benedetti por permitirnos acceder a su terreno, como también por su colaboración en la colecta de muestras de madera.

Agradecemos al Carpintero y Profesor Juan Garcia y a la Escuela Técnica de UTU en Paysandú por su colaboración en brindar un espacio para la lijada de muestras. Agradecemos a Tec. Forestal Vanessa Fender y al pasante Maximiliano Reyes quienes participaron en las salidas de campo y colecta de muestras.

Agradezco al Dr. Ariel Muñoz y a los integrantes del Laboratorio de Dendrocronología y Estudios Ambientales, PUCV, Chile, por los conocimientos adquiridos durante la pasantía realizada en su laboratorio, financiada por el Programa de Desarrollo de las Ciencias Básicas (PEDECIBA).

Se agradece a la Dra. Eugenia Ferrero por la orientación brindada a la hora de realizar cursos de Dendrocronología en el exterior, y por su apoyo durante el procesamiento de las muestras.

Agradezco al Dr. Alejandro Brazeiro por su orientación brindada como co-tutor y por compartir su laboratorio para el análisis de las muestras durante años de pandemia.

Esta tesis fue apoyada por una beca de Maestría dentro de un proyecto financiado por la Agencia Nacional de Investigación e Innovación (ANII) (FCE\_1\_2019\_1\_155963).

## 7. Referencias

- Achkar M., Brazeiro A. & Bartesaghi L., 2015. Evaluación de las principales presiones y amenazas a la biodiversidad de Uruguay. En: Brazeiro A. Ecorregiones de Uruguay. Biodiversidad, presiones y conservación. Aportes a la Estrategia Nacional de Biodiversidad. Facultad de Ciencias, CIEDUR, VS-Uruguay, SZU. Montevideo, 70-85.
- Ambite S, Ferrero M.E., Piraino S., Badagian J., Muñoz A., Aguilera-Betti I., Gamazo P., Roig F. & Lucas C. 2022. *Prosopis* L. woody growth in relation to hydrology in South America: A review. Special Issue Advances in tropical and subtropical Dendrochronology in Central and South America in *Dendrochronologia* (aceptado).  
<https://doi.org/10.1016/j.dendro.2022.126017>
- Ancajima E.A., 2017. Dendrocronología de *Prosopis sp.* en la región Piura. Universidad de Piura, Facultad de Ciencias, Escuela Profesional de Ciencias Biológicas.  
<http://repositorio.unp.edu.pe/handle/UNP/1046>
- Antezana C., Araguachi M., Arrázola S., Fernández E. & Navarro G., 200. Ecología y Biogeografía del género *Prosopis* (Mimosaceae) en Bolivia. *Revista boliviana de ecología y conservación ambiental* 8, 25-36.
- Baker P.J., Palmer J.G. & D'Arrigo R., 2008. The dendrochronology of *Callitris intratropica* in northern Australia: annual ring structure, chronology development and climate correlations. *Australian Journal of Botany* 56, 311-320.
- Barreiro M., Arizmendi F. & Trinchin R., 2019. Variabilidad observada del clima en Uruguay. Proyecto "Fortalecer las capacidades de Uruguay para la adaptación al cambio climático en la zona costera". Departamento de Ciencias de la Atmósfera Instituto de Física, Facultad de Ciencias.
- Bartaburu D., Duarte E., Montes E., Morales H. & Pereira M., 2009. Las sequías: un evento que afecta la trayectoria de las empresas y su gente. *Familias y campo: Rescatando estrategias de adaptación*. Montevideo: Instituto Plan Agropecuario, 155-168. <http://www.meteorologia.com.uy>
- Battipaglia G., Zalloni E., Castaldi S., Marzaioli F., Cazzolla-Gatti R., Lasserre B., Tognetti R., Marchetti M. & Valentini R., 2015. Long tree-ring chronologies provide evidence of recent tree growth decrease in a central African tropical forest. *PloS one* 10, e0120962.
- Bentancourt A., 2021. Evaluación del riesgo de los principales ecosistemas boscosos de Uruguay. Universidad de la República, Facultad de Ciencias, Programa de Maestría en Ciencias Ambientales.
- Bidegain M. R. & Renom M., 2002. Temperaturas extremas y amplitudes diarias en Uruguay condicionadas según el fenómeno ENOS. En: *Congreso brasileiro de meteorologia* (Vol. 12). <http://meteorologia.fcien.edu.uy/Curuguay.html>

- Biondi F. & Waikul K., 2004. Dendroclim 2002 a C++ program for statistical calibration of climate signals in tree-ring chronologies. *Computers & geosciences* 30, 303-311.
- Blasing T.J., Solomon A.M. & Duvick D.N., 1984. Response Functions Revisited. *Tree-Ring Bulletin* 1984, 1-15.
- Bogino S. & Jobbágy E., 2011. Climate and groundwater effects on the establishment, growth and death of *Prosopis caldenia* trees in the pampas (Argentina). *Forest Ecology Management* 262:1766–1774. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.07.032>
- Boninsegna J.A., 2002. Progress in South America Dendrochronology; Pages International Project; Pages news; 10 (1): 11-13
- Boninsegna J.A., Argollo J., Aravena J.C., Barichivich J., Christie D., Ferrero M.E., Lara A., Le Quesne C., Luckman B.H., Masiokas M., Morales M., Oliveira J.M., Roig F., Srur A. & Villalba R. 2009. Dendroclimatological reconstructions in South America: A review. *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleocology* 281: 210-228. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2009.07.020>
- Brazeiro A., 2015. Eco-regiones de Uruguay: biodiversidad, presiones y conservación. Aportes a la Estrategia Nacional de Biodiversidad. Facultad de Ciencias de la Udelar, Montevideo.
- Brazeiro A., 2017. Seminario: Recientes avances en investigación para la gestión y conservación del bosque nativo en Uruguay. MGAP - Facultad de Ciencias, Montevideo.
- Brazeiro A., Bentancourt A. & Haretche F., 2020. Bosques nativos de Uruguay distribución, diversidad y propuesta de clasificación. *Plantae* 3, 18.
- Brussa C.A., Grela I.A., 2007. Flora Arbórea del Uruguay: Con énfasis en las especies de Rivera y Tacuarembó. COFUSA, Montevideo.
- Burgueño, G. & Nardino C., 2018. Elementos de diseño y planificación con plantas nativas, Introducción al paisaje natural (I). Orientación gráfica, Montevideo, 256.
- Burkart A., 1976. A monograph of the genus *Prosopis* (Leguminosae subfam. Mimosoideae). *Journal of the Arnold Arboretum* 57: 450–525.
- Cangiano M.L., Cendoya M.A., Risio-Allione L.V., Bogino S.M., 2020. Dendroecology of *Prosopis* species in the world: Secular traces of natural and anthropic events and their effects on *Prosopis* growth, Latin American Dendroecology. Springer, 121-140.

Carevic F., Delatorre-Herrera J. & Carrasco A., 2017. Plant water variables and reproductive traits are influenced by seasonal climatic variables in *Prosopis burkartii* (Fabaceae) at Northern Chile. *Flora* 233: 7-11. <https://doi.org/10.1016/j.flora.2017.04.012>

Carvalho N.J.F., Alves P.M. & Vieira A.J.R., 2019 The hydrological performance of *Prosopis juliflora* (Sw.) growth as an invasive alien tree species in the semiarid tropics of northeastern Brazil. *Biol Invasions* 21:2561. <https://doi.org/10.1007/s10530-019-01994-y>

Cazes-Boezio G., Robertson A.W. & Mechoso C.R., 2003. Seasonal dependence of ENSO teleconnections over South America and relationships with precipitation in Uruguay. *Journal of Climate* 16, 1159-1176.

CONEAT, 2012. Descripción de Grupos de Suelos CO.N.E.A.T., <http://www.cebra.com.uy/renare/media/Descripci%C3%B3n-de-Grupos-de-Suelos-CONEAT-1.pdf>.

Cook E.R. & Holmes R.L., 1996. Users Manual for Program ARSTAN. Laboratory of Tree-Ring Research, University of Arizona, Tucson, USA.

Decuyper M., Chavez R.O., Copini P. & Sass-Klaassen U., 2016. A multi-scale approach to assess the effect of groundwater extraction on *Prosopis tamarugo* in the Atacama Desert. *Journal of Arid Environments* 131:25-34. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2016.03.014>

Escudero R., 2004. Informe de Consultoría. Manejo integrado de ecosistemas y recursos naturales en Uruguay. Componente: Manejo y conservación de la diversidad Biológica. Subcomponente Bosque nativo. Proyecto Combinado GEF/IBRD, Montevideo 46.

Fagúndez C., 2015. Patrones de distribución en el género *Prosopis* L.(Leguminosae): los algarrobos de Uruguay. Universidad de la República, Facultad de Ciencias, Programa de Maestría en Ciencias Ambientales.

Ferreira A., 2016. Potencial de *Scutia buxifolia* para estudios dendrocronológicos en Uruguay. Facultad de Ciencias, Universidad de la República, Uruguay.

Ferrero M.E., Villalba R., De Membiela M., Ferri Hidalgo L. & Luckman BH., 2015. Tree-ring based reconstruction of Río Bermejo streamflow in subtropical South America. *Journal of Hydrology* 525: 572–584. doi: 10.1016/j.jhydrol.2015.04.004

Ferrero M.E., Villalba R. & Rivera S.M., 2014. An assessment of growth ring identification in subtropical forests from northwestern Argentina. *Dendrochronologia* 32, 113-119.

Fritts H., 1976. Tree rings and climate. Academic, San Diego, California 567.



Garreaud R.D., 2009. The Andes climate and weather, *Adv. Geosci.* 22, 3–11.  
<https://doi.org/10.5194/adgeo-22-3-2009>

Gautrau P., 2006. Géographies d'une «destruction» des forêts dans un territoire d'herbages. Récits de crise et résilience forestière dans les campos uruguayens du XVIIIe au XXe siècle. Résumé de thèse. *Territoire en mouvement. Revue de géographie et d'aménagement* (3): 74-79.

Gautreau P., 2007. *Relatos de crisis ambiental en el Río de la Plata. Una evaluación geográfica de 300 años de relatos de “destrucción” de los bosques uruguayos (siglos XVIII al XX).* Tesis de Doctorado. Université des Sciences et Technologies de Lille - U.F.R. de Géographie - Laboratoire TERRITOIRES, Villes, Environnements et Sociétés

Grela I., 2004. *Geografía florística de las especies arbóreas de Uruguay: Propuesta para la delimitación de dendrofloras.* Tesis de Maestría en Ciencias Biológicas, PEDECIBA, Montevideo, Uruguay 97.

Grela I. & Brussa C., 2003. Relevamiento florístico y análisis comparativo de comunidades arbóreas de Sierra de Ríos (Cerro Largo - Uruguay). *Agrociencia Uruguay*, 7(2):11-26.

Groenendijk P., Sleen P., Vlam M., Bunyavejchewin S., Bongers F. & Zuidema P.A., 2015. No evidence for consistent long-term growth stimulation of 13 tropical tree species: results from tree-ring analysis. *Global change biology* 21, 3762-3776.

Haretche F., Mai P. & Brazeiro A., 2012. Woody flora of Uruguay: inventory and implication within the Pampean region. *Acta Botanica Brasilica* 26, 537-552.

Holmes R., 1983. Program COFECHA user's manual. Laboratory of Tree-Ring Research, The University of Arizona, Tucson.

Holmgren M., López B.C., Gutierrez J.R. & Squeo F.A., 2006. Herbivory and plant growth rate determine the success of El Niño Southern Oscillation-driven tree establishment in semiarid South America. *Global Change Biology* 12, 2263-2271.

Hughes M.K., 2002. Dendrochronology in climatology the state of the art. *Dendrochronología* 20: 95-116.

Humanes-Fuente V., Ferrero M.E., Muñoz A.A., González-Reyes Á., Requena-Rojas E.J., Barichivich, J. & Layme-Huaman E.T., 2020. Two centuries of hydroclimatic variability reconstructed from tree-ring records over the Amazonian Andes of Peru. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125(18), e2020JD032565.

INIA., 2022. Oportunidades y desafíos del uso de los bosques nativos integrados a la producción ganadera de Uruguay. Serie Técnica N° 261, Montevideo.

- INTI-CITEMA, 2003. Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI). Densidad de maderas (Kg/m<sup>3</sup>) ordenadas por nombre común, Ing. Ftal. María Elena Atencia.
- IPCC .2021. Summary of Policymakers. Allan R. P., Hawkins E., Bellouin N. & Collins, B.
- Karlin U. & Díaz R., 1984. Potencialidad y manejo de algarrobos en el árido subtropical argentino (No. 583.321 574.5265). Secretaría de Ciencia y Técnica, Programa Nacional de Recursos Naturales Renovables.
- Lisi C.S., Fo M.T., Botosso P.C., Roig F.A., Maria V.R., Ferreira-Fedele L.& Voigt, A.R., 2008. Treering formation, radial increment periodicity, and phenology of tree species from a seasonal semi deciduous forest in southeast Brazil. *Iawa Journal* 29, 189-207.
- López B.C., Sabaté S., Gracia C.A. & Rodríguez R., 2005. Wood anatomy, description of annual rings, and responses to ENSO events of *Prosopis pallida* H.B.K., a wide-spread woody plant of arid and semi-arid lands of Latin America. *Journal of Arid Environments* 61:541–554.  
<https://doi.org/10.1016/j.Jaridenv.2004.10.008>
- López L. & Villalba R., 2016. An assessment of *Schinopsis brasiliensis* Engler (Anacardiaceae) for dendroclimatological applications in the tropical Cerrado and Chaco forests, Bolivia. *Dendrochronologia* 40, 85-92.
- Lucas C., Ceroni M., Baeza S., Muñoz A. & Brazeiro A., 2017. Sensitivity of subtropical forest and savanna productivity to climate variability in South America, Uruguay. *Journal of Vegetation Science* 28:192-205.
- Lucas C., Puchi P., Profumo L., Ferreira A. & Muñoz A., 2018. Effect of climate on tree growth in the Pampa biome of Southeastern South America: First tree-ring chronologies from Uruguay. *Dendrochronologia* 52:113-122.
- Martino L.A., 2012. La expansión de *Ligustrum lucidum* WT Aiton. En la cuenca media del Río Santa Lucía (Uruguay). Acción del clima en el reclutamiento. Facultad de Ciencias, Universidad de la República, Uruguay.
- Mendina M., & Pisciotano G., 2002. Cambios en la variabilidad espacial de la precipitación en Uruguay asociadas a “el niño” y aplicación a la mejora de pronósticos climáticos. Disertación en XII Congresso Brasileiro de Meteorologia, Foz de Iguaçu-PR, 2002.
- MGAP, MVOTMA, UNIQUE, Hesen Forst. 2018. Estrategia Nacional de Bosque Nativo. Tradinco S.A
- Morales M.S. & Villalba R., 2012. Influence of precipitation pulses on long-term *Prosopis ferox* dynamics in the Argentinean intermontane subtropics. *Oecologia* 168:381-392.

<https://doi.org/10.1007/s00442-011-2087-9>

Morales M.S., Villalba R., Grau H.R. & Paolini L., 2004. Rainfall-controlled tree growth in high-elevation subtropical treelines. *Ecology* 85:3080–3089. <https://doi.org/10.1890/04-0139>

Mundo I.A., Roig Junent F.A., Villalba R., Kitzberger T. & Barrera M.D., 2012. *Araucaria araucana* tree-ring chronologies in Argentina: spatial growth variations and climate influences. *Trees-Structure and Function* 26, 443-458.

Olivares A., Castillo H. & Potter W., 1989. Cambios en el contenido de humedad. Composición botánica y producción de fitomasa en la pradera anual mediterránea bajo la influencia del espino (*Vachellia caven*). *Avances en Producción Animal* 14 (1-2):41-52.

Oliveira J.M., Santarosa E., Pillar V.D. & Roig F.A., 2009. Seasonal cambium activity in the subtropical rain forest tree *Araucaria angustifolia*. *Trees* 23, 107-115.

Panario D., Gutiérrez O., Bettucci L. S., Peel E., Oyhantçabal, P. & Rabassa, J., 2014. Ancient landscapes of Uruguay. En: *Gondwana Landscapes in southern South America*, 161-199. Springer Netherlands.

Paruelo J.M., Pineiro G., Baldi G., Baeza S., Lezama F., Altesor A. & Oesterheld, M., 2010. Carbon Stocks and Fluxes in Rangelands of the Rio de la Plata Basin. *Rangeland Ecology & Management* 63, 94-108.

Pacheco-Solana A., Andreu-Hayles L., Oelkers R., Tejedor Vargas E., Ferrero E., Rodriguez Caton M., Maldonado C. & Santos G. 2021. Radiocarbon and wood anatomy as key novel tools to generate an annual tree-ring chronology from *Prosopis alba* in the tropical Bolivian Andes. In *AGU Fall Meeting Abstracts 2021*.

Pasiecznik N.M., Harris P.J.C. & Smith S.J., 2004. *Identifying Tropical Prosopis Species: A Field Guide*. HDRA, Coventry, UK. ISBN 0 905343 34 4

Piaz A., 2020. ¿Está incidiendo el cambio climático en las tasas de crecimiento de las plantaciones de *Pinus taeda* y *Pinus elliottii* en Uruguay?, Centro Universitario Regional Norte - Sede Tacuarembó, Ingeniería Forestal, Universidad de la República, Uruguay.

Pinheiro J., Bates D., DebRoy S., Sarkar D. & R Core Team, 2013. nlme: Linear and Nonlinear Mixed Effects Models. R package version 3.1, 108.

Piraino S., Abraham E.M., Diblasi A. & Roig F.A., 2015. Geomorphological-related heterogeneity as reflected in tree growth and its relationships with climate of Monte Desert *Prosopis flexuosa* DC woodlands. *Trees* 29:903–916. <https://doi.org/10.1007/s00468-015-1173-8>

- Profumo L., 2010. Estudo de anéis de crescimento de espécies arbóreas de ambientes fluviais da bacia do rio Tacuarembó, Uruguai. Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias - Centro de Ciências Florestais e da Madeira, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal.
- Ramirez J.A. & del Valle J.I., 2011. Paleoclimate of La Guajira, Colombia; by the growth rings of *Capparis odoratissima* (Capparidaceae). *Revista de Biología Tropical* 59, 1389-1405.
- Rayner N., Parker D.E., Horton E., Folland C., Alexander L., Rowell D., Kent E. & Kaplan A., 2003. Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 108.
- Ribaski J. & Guetten S., 2015. Sistemas agroflorestais na região Sul do Brasil. En: Villa A., Valdemir A., Giolo R. Sistemas agroflorestais, a agropecuária sustentável. Embrapa, Brasília 45 - 68.
- Risio Allione L., Lara Henao W., Bogino S. & Bravo F., 2018. Aridity variations in the semiarid Argentinean Pampas: How they affect *Prosopis caldenia* growth at the edge of the world distribution area. *Dendrochronologia* 50:126-133. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2018.05.003>
- Salazar P.C., Navarro-Cerrillo R.M., Ancajima E., Duque Lazo J., Rodríguez R., Ghezzi I. & Mabres A., 2018. Effect of climate and ENSO events on *Prosopis pallida* forests along a climatic gradient. *Forestry: An International Journal of Forest Research* 91(5):552–562. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpy014>
- Schulman E., 1956. Dendroclimatic changes in semiarid America. *Dendroclimatic changes in semiarid America*.
- SINAE-MIDES, 2020. Uruguay: Compendio de mapas de riesgo. Bogotá, D.C., Colombia
- Soriano A., 1992. The Río de la Plata grasslands. En: Coupland, R.T. (Ed.), *Natural Grasslands. Introduction and Western Hemisphere*. Elsevier, Amsterdam, Netherlands 367-407.
- Speer J.H., 2010. *Fundamentals of Tree-ring Research*. University of Arizona Press, Tucson.
- Stahle D.W., 1999. Useful strategies for the development of tropical tree-ring chronologies. *IAWA Journal* 20, 249-253.
- Stokes M.A. & Smiley T.L., 1968. *An Introduction to Tree-ring Dating*. The University of Chicago Press, Chicago.
- Trouet V. & Van Oldenborgh, G.J., 2013. KNMI climate explorer: a web-based research tool for high resolution paleoclimatology. *Tree-Ring Research* 69, 3-13.
- Viglizzo E.F. & Frank F.C., 2006. Land-use options for Del Plata Basin in South America: Tradeoffs

analysis based on ecosystem service provision. *Ecological Economics* 57, 140-151.

Villagra, P.E., Roig, F.A., 1997. Wood structure of *Prosopis alpataco* and *Prosopis argentina* growing under different edaphic conditions. *Iawa Journal* 18, 37-51.

Villagra P.E., Vilela A., Giordano CV. & Alvarez J.A., 2010. Ecophysiology of *Prosopis* species from the arid lands of Argentina: What do we know about adaptation to stressful environments?. En Ramawat, K.G. *Desert Plants. Biology and Biotechnology* y. Springer-Verlag. Berlin-Heidelberg 322-354. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-02550-1\\_15](https://doi.org/10.1007/978-3-642-02550-1_15)

Villalba R., 1985. Xylem Structure and Cambial Activity in *Prosopis flexuosa* DC. *IAWA Journal* 6, 119-130.

Villalba R. & Boninsegna J.A., 1989. Dendrochronological studies on *Prosopis flexuosa* DC. *IAWA Bulletin* 10(2):155–160. <https://doi.org/10.1163/22941932-90000483>

Villalba R., Villagra P.E., Boninsegna J.A., Morales MS. & Moyano V., 2000. Dendroecología y dendroclimatología con especies del género *Prosopis* en Argentina. *Multequina* 9(2):1–18.

Wagner F., Rossi V., Aubry-Kientz M., Bonal D., Dalitz H., Gliniars R., Stahl C., Trabucco A. & Herault B., 2014. Pan-tropical analysis of climate effects on seasonal tree growth. *PLoS One* 9, e92337.

Wigley T., Briffa K., Jones P., 1984. On the average value of correlated time series, with applications in dendroclimatology and hydrometeorology. *Journal of Climate and Applied Meteorology* 23, 201-213.

Worbes M., 2002. One hundred years of tree-ring research in the tropics—a brief history and an outlook to future challenges. *Dendrochronologia* 20, 217-231.

Zuidema P.A., Baker P.J., Groenendijk P., Schippers P., van der Sleen P., Vlam M. & Sterck, F., 2013. Tropical forests and global change: filling knowledge gaps. *Trends in Plant Science* 18, 413-419.

## 8. Anexo

**Tabla 5.** Anomalías observadas en las cronologías de ancho de anillo (anomalía >1 (anillos anchos), -1 (anillos angostos)). En rojo oscuro se muestran las sequías registradas en Uruguay (1916-17, 1942-43, 1964-65, 1988-89, 1999-00, 2005-06, 2008-09), y en rojo claro +/- 1 año. En azul oscuro se muestran las inundaciones registradas en Uruguay (1959, 1997-98, 2001, 2007, 2009, 2010, 2013, 2014), y en azul claro +/- 1 año (SINAE MIDES 2020).

| Año  | DAG | LBU | DRQ |
|------|-----|-----|-----|
| 1903 | -1  |     |     |
| 1905 | -1  |     |     |
| 1910 |     | -1  |     |
| 1912 | 1   |     | 1   |
| 1913 |     |     | -1  |
| 1914 | 1   |     | 1   |
| 1915 | -1  |     |     |
| 1916 | -1  |     | 1   |
| 1917 |     |     | 1   |
| 1919 |     |     | 1   |
| 1920 | 1   |     |     |
| 1921 | 1   |     |     |
| 1922 | 1   |     |     |
| 1923 | 1   |     |     |
| 1925 | 1   |     |     |
| 1926 |     |     | 1   |
| 1927 |     |     |     |
| 1928 |     |     |     |
| 1929 |     |     |     |
| 1931 |     |     |     |

|      |    |    |    |
|------|----|----|----|
| 1932 |    |    |    |
| 1933 |    |    |    |
| 1934 | 1  |    |    |
| 1936 |    |    | 1  |
| 1937 |    | 1  | -1 |
| 1938 |    |    | -1 |
| 1939 |    |    | -1 |
| 1941 | 1  |    |    |
| 1942 | 1  | -1 |    |
| 1943 | -1 | -1 | 1  |
| 1944 | -1 |    |    |
| 1945 | -1 |    | 1  |
| 1946 |    | 1  |    |
| 1947 | 1  | 1  |    |
| 1949 |    |    | -1 |
| 1950 |    |    | -1 |
| 1951 | 1  | -1 |    |
| 1953 |    |    | 1  |
| 1954 | -1 |    |    |
| 1957 | 1  |    |    |
| 1960 |    |    | -1 |
| 1961 |    | 1  |    |
| 1962 |    |    | 1  |
| 1963 |    | -1 | 1  |
| 1964 | -1 |    |    |
| 1965 |    | 1  |    |

|                    |       |       |       |
|--------------------|-------|-------|-------|
| 1966               |       | 1     |       |
| 1970               |       |       | -1    |
| 1971               |       | -1    |       |
| 1972               |       | 1     |       |
| 1974               | 1     |       |       |
| 1976               |       | 1     | -1    |
| 1978               |       | -1    |       |
| 1979               |       |       | 1     |
| 1988               |       | 1     |       |
| 1989               |       | -1    |       |
| 1990               |       |       | 1     |
| 1995               |       | -1    |       |
| 1996               |       | 1     |       |
| 2002               |       |       | -1    |
| 2004               |       |       | 1     |
| 2009               |       |       | 1     |
| Total de registros | 25/63 | 22/63 | 30/63 |





*Anillos de crecimiento identificables a simple vista en cortes transversales de Prosopis nigra*  
(Crédito foto C. Lopez Gonzalez)

## Capítulo 4

### Conclusiones generales

A continuación, se detallan las principales conclusiones obtenidas en cada capítulo:

1. A pesar de que la dendrocronología representa una poderosa herramienta para el entendimiento de la variabilidad ambiental y climática, el Banco Internacional de Datos de Anillos de Árboles (International Tree-ring Data Bank (ITRDB)), donde se encuentran muchas de las cronologías en árboles realizadas en el mundo, muestra un gran sesgo en su información, debido principalmente al predominio de estudios usando especies gimnospermas en el hemisferio norte, con aproximadamente el 75% de los datos perteneciendo a América del Norte y Europa. Sin embargo, en las últimas décadas se ha logrado desarrollar cronologías certeras en estas regiones, ayudando a comprender el funcionamiento de ecosistemas boscosos tropicales, subtropicales y áridos, en África, Asia, Oceanía y América del Sur, aportando datos esenciales para comprender mecanismos y procesos globales (**Capítulo 1**).
2. Los datos dendrocronológicos en las llanuras tropicales y subtropicales son limitados, incluyendo la Cuenca del Amazonas y el bioma Pampa, pero han resultado valiosos a la hora de evaluar la variabilidad hidrológica, mostrando correlación principalmente con el régimen de precipitaciones. Dado el aumento en las lluvias observado en América del Sur desde la década de 1970 y la tendencia a que esta situación continúe frente a futuros escenarios de cambio climático, entender cómo la variabilidad en las precipitaciones puede afectar la productividad y el crecimiento de los árboles representa una prioridad en la región (**Capítulo 1**).
3. Las especies arbóreas del género *Prosopis* L. han jugado un importante rol en el desarrollo de la investigación en anillos de crecimiento en eco-regiones áridas y semiáridas de América del Sur. Dada la distribución de *Prosopis* a lo largo de un amplio gradiente de precipitación de 0-2000 mm año<sup>-1</sup> y la característica freatófita presente en muchas especies del género, la relación entre su crecimiento y la disponibilidad de agua ha sido un tema recurrente durante el último siglo (**Capítulo 2**).
4. Al realizar una revisión sistemática de la literatura que aborda a *Prosopis* en relación a diversos parámetros hidrológicos en América del Sur, encontramos que la distribución espacial de los sitios de estudio abarca latitudes tropicales-subtropicales y templadas de 4° a 35°S. Los estudios cubrieron un amplio rango de elevaciones desde 30 hasta 3500 m.s.n.m., y PMA de 1 hasta 730 mm año<sup>-1</sup>. *Prosopis* presenta adaptaciones frente a condiciones áridas, de gran utilidad para el estudio de los anillos de crecimiento en especies leñosas como indicadores de sequías históricas y variabilidad en los niveles de napas freáticas (**Capítulo 2**).
5. Existe potencial para expandir el rango geográfico de los estudios sobre hidrología usando *Prosopis* a regiones húmedas con ausencia de una estación seca. Se identificaron lagunas geográficas en la investigación en climas subhúmedos y húmedos, estepas patagónicas y regiones de gran altitud en Bolivia, Ecuador, Colombia y Venezuela, donde los datos publicados son actualmente escasos. Teniendo en cuenta la creciente escasez de agua dulce en regiones donde se encuentra *Prosopis*, su contribución a la comprensión de las tendencias históricas en la disponibilidad de agua es crucial (**Capítulo 2**).
6. Se destaca una frecuente correlación positiva entre el crecimiento anual de *Prosopis* y la precipitación, pudiendo estas camuflarse por la relación de las especies freatófitas con recursos de aguas subterráneas (**Capítulo 2**).
7. *Prosopis* representa un recurso humano con valores socioeconómicos y culturales en todo el continente americano; dado su valor y su declive histórico en muchas regiones, los datos que contribuyan al manejo

sostenible y la conservación de esta especie son de suma importancia. Las especies de este género constituyen la principal fuente de datos dendrocronológicos en muchos ecosistemas áridos y semiáridos de América del Sur (**Capítulo 2**).

8. La investigación dendrocronológica en Uruguay tiene el potencial de fortalecer vacíos en la información sobre la variabilidad climática histórica en nuestra región. Esta tesis provee la primera fuente de datos dendrocronológicos usando el género *Prosopis* en nuestro Uruguay y se encuentra entre las pocas disponibles para el sureste de América del Sur (**Capítulo 3**).
9. La variabilidad del ancho de anillo de las cronologías obtenidas en esta tesis, estuvo principalmente correlacionada con la disponibilidad de agua y en segundo lugar con la temperatura. Las características topográficas entre los sitios de estudio posiblemente influyeron en la respuesta de las cronologías frente al régimen de precipitaciones, promoviendo el crecimiento en sitios altos y drenables y perjudicándolo en el sitio bajo e inundable con presencia de parches halomórficos. La respuesta diferencial entre sitios también puede estar influenciada por la especie trabajada en cada sitio, aunque es más probable que la diferencia está dada por la preferencia de tipos de suelos de cada especie (**Capítulo 3**).
10. Este trabajo refuerza a las investigaciones que demuestran que los árboles pueden producir anillos de crecimiento anuales incluso en climas sin una estación seca o húmeda marcada, presentando correlación entre el crecimiento y la disponibilidad de agua, a través de la influencia de una marcada estacionalidad en la temperatura, que produce variabilidad en el índice de evapotranspiración, modificando los reservorios de agua (**Capítulo 3**).
11. La dendrocronología representa una importante herramienta para el estudio de la variabilidad climática histórica y la respuesta de los bosques frente a la misma; llenar vacíos de información en regiones donde esta herramienta se encuentra poco desarrollada, como el sudeste de América del Sur, apoya la formación de una base de datos más rica y eficiente a la hora de predecir los efectos de la variabilidad climática en formaciones vegetales (**Capítulo 3**).