



Universidad de Valladolid
Campus de Palencia

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIERÍAS AGRARIAS**

Máster Universitario en Ingeniería de Montes

**RESPUESTA INDIVIDUAL DE *Prosopis caldenia*
A LAS VARIABLES CLIMÁTICAS
EN LOS BOSQUES DE LA REGIÓN
SEMIÁRIDA DE ARGENTINA**

Guillermo Jové Alcalde

**Directora: Stella Marys Bogino
Tutor: Felipe Bravo**

Julio 2014

A mi amiga, y abuela,

Henar.

Agradecimientos

“Es de bien nacido el ser agradecido”. Ésta puede que sea una de las frases que más he escuchado decir a mi madre a lo largo de mi vida; sólo espero no olvidarme a nadie:

A Sergio Rosa y familia, por permitirnos tomar las muestras en su campo.

A la Universidad Nacional de San Luis y al proyecto PICT0745, por el soporte en equipamiento, infraestructura y recursos económicos para los análisis de este trabajo.

A la Universidad de Valladolid y a Felipe Bravo, por darme la oportunidad de participar en este intercambio.

A Jorge Leporati, por colaborar desinteresadamente en los análisis estadísticos.

A Mirta Gómez, por amenizar con sus anécdotas y charlas sobre el ‘folcklore’ argentino las mañanas de laboratorio.

A Esteban Dussart, porque en dos días de campo y carretera se aprende más que en todos los libros.

A Mariano Amoroso, por facilitarme la tesis que relacionaba las respuestas climáticas según las clases de edad.

A Stella Bogino, por su dedicación, sus correcciones y su motivación cuando las cosas no salían a la primera. Porque además de directora ha sido una buena amiga y porque el amor que siente hacia su profesión de docente debería servir de ejemplo para muchas personas.

A Mati, a los compañeros y compañeras de la COR, a la familia de ‘Ingrávito’ y a todos los mercedinos y mercedinas, autóctonos o de adopción, que me han acogido tan bien estos 6 meses, haciéndome sentir como en casa.

A Sofía, fiel compañera de departamento, por compartir el día a día en Villa Mercedes.

A David, por compartir esta experiencia única desde los preparativos, allá por junio de 2013, hasta el final.

A Teresa, porque sin su buena acogida, sin sus consejos y sin su amabilidad todo hubiera sido mucho más difícil.

A mis amigas y amigos, porque estando tan lejos es cuando más se agradecen sus ánimos.

A mi madre, mi padre y mi hermana por apoyarme siempre que emprendo nuevos proyectos por alocados que parezcan.

A Carolina, porque hay compañeras, y viajes, que duran toda una vida.

Resumen

El caldenal, un bosque xerófilo que se encuentra en la región semiárida de Argentina, está dominado por *Prosopis caldenia* Burkart., una especie emblemática de la historia forestal argentina que en la actualidad se encuentra en estado crítico. La extensión de la frontera agrícola y el consecuente desplazo de la ganadería están ocasionando una pérdida de superficie forestal que amenaza al bosque y lo fragmenta en forma de mosaicos dispersos. Esta situación, unida al contexto de cambio global, hace necesaria una revalorización de esta especie que evite su completa marginación; este trabajo, cuya finalidad es ayudar a comprender mejor su dinámica de crecimiento y su relación con el clima, puede ayudar en esta tarea. El análisis dendrocronológico de dieciocho árboles de caldén ubicados en dos rodales con densidades contrastantes, uno con árboles desarrollándose sin competencia y otro con árboles compitiendo entre sí, permitió estimar las liberaciones acontecidas en la masa a lo largo del tiempo, las curvas de crecimiento medio y acumulado, y el análisis dendroclimático para el conjunto del rodal y para cada individuo en particular frente a las variables climáticas de precipitación y temperatura. La medición de las variaciones interanuales en el ancho de anillos se realizó con una precisión de 0,01 mm y permitió un correcto cofechado de las muestras. Se encontraron liberaciones fuertes en el rodal sin competencia que confirman que esos árboles se desarrollaron libres durante más de 50 años. Las dinámicas de crecimiento con respecto a la edad son significativamente parecidas entre ambos rodales, sin embargo los valores medios de crecimiento resultaron significativamente superiores en el rodal sin competencia (5,12 mm). El análisis clima-crecimiento del conjunto de árboles arrojó diferentes asociaciones en función de la densidad del rodal, siendo la respuesta más uniforme, y comparable con otras masas de caldén de la región, la del rodal con competencia. La precipitación por lo general deja menos señal en los árboles que las temperaturas. En el análisis individual aparece mayor respuesta cuando se trabaja con las temperaturas máximas y mínimas: en los individuos sin competencia son más determinantes las máximas, mientras que en los individuos con competencia lo son las mínimas. Éstas últimas dividen a los árboles de ambos rodales en dos grupos en función de su respuesta, por un lado los menores de 70 años ofrecen una respuesta negativa, por el otro los más maduros tienen una respuesta positiva. La respuesta individual es, en todos los casos, más heterogénea que lo que reflejan los resultados conjuntos y permite apreciar que algunos árboles son más sensibles al clima que otros. Entender al completo la relación entre el caldén y el clima se antoja, cuanto menos, una tarea complicada, los resultados de este trabajo aportan nueva información y ponen de relevancia la necesidad de implementar nuevas técnicas en el análisis dendroclimático, como el estudio de cada árbol individual, para seguir avanzando y profundizando en el conocimiento de esta especie.

Palabras clave: Dendrocronología, Dendroclimatología, *Prosopis caldenia*, Estudio individual, Dinámica de crecimiento.

Índice

1. Introducción	3
2. Antecedentes	11
3. Objetivos	15
4. Material y métodos	19
4.1. Zona de estudio	19
4.1.1. Los rodales	20
4.2. Metodología de trabajo	22
4.2.1. Las muestras	22
4.2.2. Preparación de las muestras	23
4.2.3. Análisis de laboratorio	24
4.2.4. Cofechado y liberaciones	25
4.2.5. Crecimientos radiales	25
4.2.6. Análisis dendroclimático	26
5. Resultados	31
5.1. Cofechado y liberaciones	32
5.2. Crecimientos radiales	33
5.3. Análisis dendroclimático	36
5.3.1. Comparativa a nivel rodal	36
5.3.2. Comparativa árboles individuales de SR100	39
5.3.3. Comparativa árboles individuales de SR200	44

6. Discusión	53
6.1. Cofechado y liberaciones	53
6.2. Crecimientos radiales	54
6.3. Análisis dendroclimático	55
6.3.1. Comparativa a nivel rodal	55
6.3.2. Comparativa árboles individuales de SR100	56
6.3.3. Comparativa árboles individuales de SR200	57
6.3.4. Relevancia del análisis individual	58
7. Conclusiones	61
8. Bibliografía	65
Anejos	73
Anejo I. Fotografías	73
Anejo II. Comandos de R: crecimientos radiales	75
Anejo III: Comandos de R: análisis dendroclimático	76
Anejo IV: Tabla resumen de árboles individuales	79

1. INTRODUCCIÓN

1. Introducción

Los bosques forman un sistema natural complejo que, junto a los mares y océanos, constituyen el sustento esencial para la vida en la tierra. Son indispensables para el mantenimiento de la biodiversidad de los ecosistemas y para la regulación del clima del planeta (SAyDS, 2005), además han sido históricamente un elemento importantísimo en el desarrollo de la vida del hombre, casi todas las sociedades han utilizado directa o indirectamente los recursos que proporcionan los ecosistemas forestales; de todos ellos la madera, bien como combustible o bien como elemento constructivo, ha sido generalmente el producto más aprovechado (Perlin, 1999).

En la República Argentina, según datos del Instituto Geográfico Militar y del Primer Inventario de Bosques Nativos, casi un 34% de la superficie del país, considerando ésta como la asentada en el continente americano, es decir, excluyendo la Antártida Argentina, puede incluirse en la categoría de "Paisaje Forestal". Estos datos suponen un porcentaje bastante elevado teniendo en cuenta que, por ejemplo, España cuenta actualmente con tan sólo un 28 % de superficie forestal (Montero y Serrada, 2013), por lo que, sin lugar a dudas, muestran el gran potencial que tiene Argentina para desarrollar este sector. Sin embargo, la sociedad argentina ha crecido de espaldas a sus recursos forestales, entre otras causas por la lejanía de las zonas boscosas de los mayores centros poblados del país y por el hecho de haberse asumido como un país agrícola y ganadero (SAyDS, 2005).

En las estadísticas mencionadas se puede diferenciar entre: "Bosque Nativo" (FCC > 20%; S > 10 ha; $h_{\text{madurez}} > 7$ m) y "Otras Tierras Forestales" (FCC = 5-20%; S > 10 ha; $h_{\text{madurez}} > 7$ m o cubierta arbustiva > 20%). Considerando únicamente la superficie de bosques nativos el porcentaje disminuye hasta el 12%; y es que, a pesar de su importancia ambiental, desde el período colonial su enfoque ha sido exclusivamente comercial y la disminución en cantidad y calidad de éstos ha sido una constante en todas las regiones (SAyDS, 2005).

El territorio argentino se encuentra clasificado en seis Regiones Forestales (Figura 1A) en función de los bosques nativos que podemos encontrar en las distintas partes del país: el Parque Chaqueño (67.641.108 ha), la Selva Misionera (2.960.857 ha), la Selva Tucumano-Boliviana (5.476.394 ha), el Bosque Andino-Patagónico (7.599.816 ha), el Monte (47.191.093 ha) y el Espinal (32.939.454 ha).

La región del Espinal, que es la tercera más grande en cuanto superficie, se ubica entre los 28° y los 40° de latitud Sur, como una extensa faja que se inicia en el centro-sur de la provincia de Corrientes, norte y centro de Entre Ríos, centro de Santa Fe, este, centro y sur de Córdoba, centro y sur de San Luis, bajando luego hacia el este y

centro de La Pampa para concluir en el sur de Buenos Aires (SAyDS, 2005). En ella podemos encontrar tres subregiones o distritos: distrito del Ñandubay, distrito del Algarrobo y distrito del Caldén; cuyas especies dominantes son las mismas que los dan nombre, *Prosopis affinis* Sprengel, *Prosopis flexuosa* D.C. y *Prosopis Caldenia* Burkart, respectivamente.

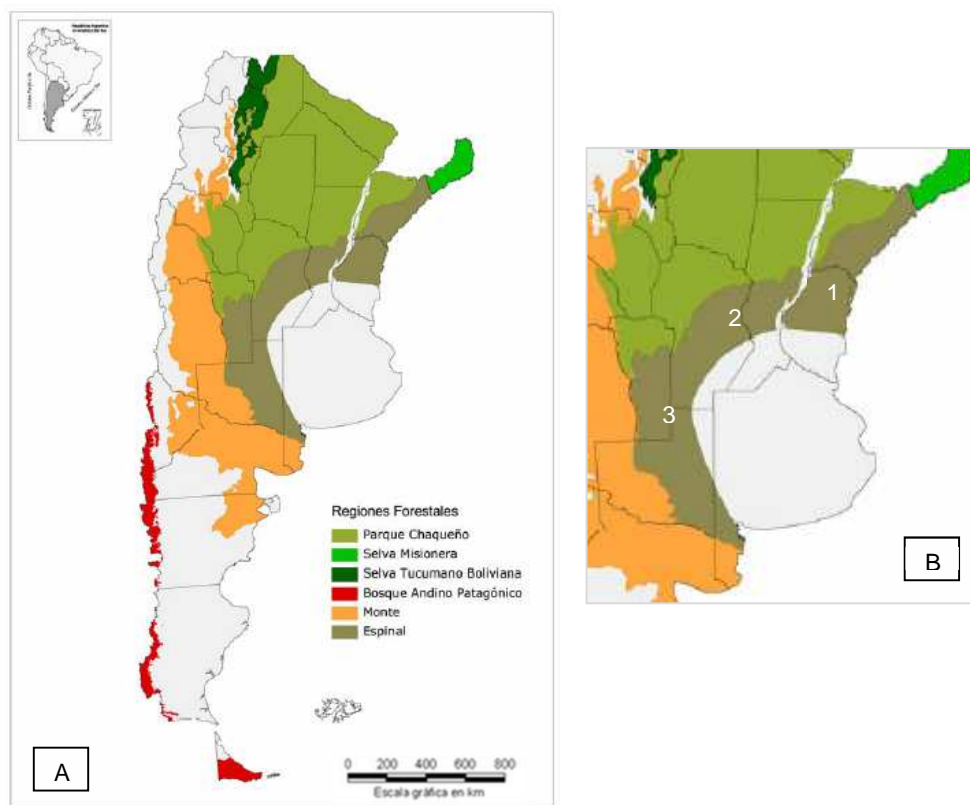


Figura 1. Mapa de las Regiones Forestales de la República Argentina. Primer Inventario Nacional de Bosques Nativos (SAyDS, 2005) (A). Distritos dentro de la Región Espinal: Ñandubay (1), Algarrobo (2) y Caldén (3) (B).

El distrito del Caldén, a pesar de ser el más seco, ocupa unos 4.000.000 ha y concentra casi toda la superficie forestal del Espinal, debido a que en los otros distritos el cambio de uso del suelo, hacia actividades agrícolas y ganaderas, ha ocurrido con mayor celeridad. Como se aprecia en la Figura 1B, está situado al sur de esta Región, aunque hay que reconocer que los límites son un tanto difusos: en su vertiente oeste forma extensos ecotonos con la Región del Monte, en el este ha visto reducido su área original por la expansión de la frontera agrícola y en la parte norte, al encontrarse con el distrito del Algarrobo, el límite está muy degradado (SAyDS, 2006).

El caldenal, un bosque xerófilo dominado por *Prosopis caldenia*, es la formación arbórea predominante en esta subregión. Su estructura rara vez es de bosque puro, generalmente se presenta asociado con otras leñosas arbóreas como algarrobo (*P. flexuosa*), tala (*Celtis spinosa* Spreng) y chañar (*Geoffroea decorticans* Burkart), con escaso estrato arbustivo y pastizales densos compuestos por gramíneas perennes

mixtas (Bogino, 2006). En realidad, es bastante complicado encontrar dos áreas idénticas puesto que sus propiedades florísticas, estructurales y funcionales se ven condicionadas tanto por variaciones en el relieve y el material parental de los suelos, como por innumerables perturbaciones, a saber, áreas desmontadas, fuegos frecuentes, pastoreo de ganado vacuno y escasa planificación forestal. Por ello se puede generalizar que los diferentes tipos de fisonomías encontradas (Figura 2) (caldenal con arbustos, caldenal con pastizal, caldenal abierto tipo sabana y caldenal denso con arbustos) son variaciones de un mismo tipo de vegetación afectado por distintos factores ecológicos y antrópicos que aumentan la heterogeneidad de la vegetación (SAyDS, 2006).

En cuanto a la fauna, es difícil clasificarla por encontrarse en una zona de transición entre el Chaco y la Pampa, aparecen carnívoros, como pumas (*Puma concolor* L), zorro gris (*Pseudalopex gymnocercus* Fischer), zorrinos (*Conepatus humboldti* Gray) y hurones (*Galictis cuja* Molina), herbívoros autóctonos, como la vizcacha (*Lagostomus maximus* Desmarest), e introducidos, como el ciervo colorado (*Cervus elaphus* L), el chancho jabalí (*Sus scrofa* L) y la liebre europea (*Lepus europaeus* Pallas). En las zonas de planicie también es frecuente encontrar ñandú (*Rhea americana* L), un ave similar al avestruz, y otros pequeños mamíferos como el peludo o armadillo (*Chaetophractus vellosus* Desmarest).



Figura 2. Variación fisonómica de los bosques de caldén. Caldenal con arbustos (A). Caldenal con pastizal (B). Caldenal abierto tipo sabana (C).

La situación actual del caldenal podría clasificarse como crítica, estos bosques están siendo amenazados por la extensión de la frontera agrícola favorecida, a su vez, por los altos valores de mercado de los productos agropecuarios, el aparente incremento de las precipitaciones en la región en los últimos años y la implementación de nuevas tecnologías que permiten usar como cultivo estas tierras otrora incultivables (SAyDS, 2006). El distrito del caldenal limita con el área de mayor productividad agrícola del país, la Pampa; el avance de dicha frontera agrícola produce además un desplazamiento de la ganadería hacia zonas más áridas, originando, como resultado, una pérdida importante de superficie forestal. En la provincia de San Luis ésta pérdida resulta cada año de un 1,4% de la superficie original de estas formaciones (Gómez Hermida *et al.*, 2002; SAyDS, 2006), cifra que se mantiene en esta última década a tenor de la imparable extensión de los cultivos agroindustriales en toda la región (MAGyPN, 2012). Uno de los mayores problemas que resultan de esta situación es la constante fragmentación de las masas boscosas, la cual provoca una ruptura del hábitat con la consiguiente pérdida de los corredores de biodiversidad naturales y el aislamiento de las poblaciones (SAyDS, 2006).

El caldén, especie principal de estos montes, pertenece a la familia *Fabaceae*, subfamilia *Mimosoideae*. Este árbol de corteza rugosa que puede alcanzar los 12-15 metros de altura, tiende a bifurcarse a baja altura y presenta abundantes y tortuosas ramificaciones (Figura 3A). Sus hojas caducas, compuestas, alternas y paripinnadas, tienen entre 25 y 35 pares de pequeños folíolos (Figura 3B). Posee también espinas caulinares de 0,5 a 2,5 cm de longitud que suelen ser más grandes en los ejemplares jóvenes y en los rebrotes. La floración tiene lugar en primavera (octubre-noviembre) y da como resultado unas flores actinomorfas de color amarillo que se disponen en espigas axilares de 5 a 8 cm de longitud (Burkart, 1939; 1967). El fruto, conocido como chaucha, consiste en una legumbre helicoidal (Figura 3C) muy apetecida por la fauna autóctona y el ganado, siendo la zoocoria endozoica la principal vía de dispersión de sus semillas, aunque también puede rebrotar vegetativamente de cepa (SayDS, 2006).

Este árbol, muy utilizado tradicionalmente por la calidad de su madera, hoy en día ha sido relegado a un segundo plano por la industria forestal. No obstante tiene una gran importancia en la historia forestal de la República Argentina: hasta la “Campaña del Desierto” en el siglo XIX, los ranqueles, el pueblo originario que habitaba en el distrito del caldenal, lo consideraban árbol sagrado y extraían sus productos sin llegar a destruir el recurso; tras la expulsión de éstos, a finales del siglo XIX, las ferroviarias inglesas lo utilizaron para construir las líneas de ferrocarril; y posteriormente, en los años 30 del siglo XX, los investigadores Fisher y Krebs realizaron sobre ella el primer estudio de anillos de crecimiento de todo el país y, presumiblemente, de todo el Hemisferio Sur, lo que convierte a esta especie en una precursora en los estudios dendrocronológicos (Bogino, 2006).



Figura 3. Típico árbol del caldén con bifurcación a baja altura y abundante ramificación (A). Detalle de la hoja de caldén, se aprecian las espinas y los folíolos (B). Detalle de la legumbre (chaucha) del caldén.

La dendrocronología es la ciencia que se ocupa de la datación de los anillos de crecimiento de las plantas arbóreas y arbustivas leñosas. Ésta analiza patrones espaciales y temporales de procesos biológicos, físicos o culturales, y provee información sobre eventos ambientales presentes y pasados, como los relacionados con el clima, incendios o plagas (Speer, 2010). Para ello considera cada árbol como un instrumento de registro de las distintas variables que pueden influenciar sobre su crecimiento, es decir, se podría considerar el crecimiento en un año particular (R_t) en función de una serie de factores que se agregan linealmente: A_t , tendencia biológica de crecimiento relacionada con la edad del árbol; C_t , señal climática en el año t ; $D1_t$, componente de disturbios endógenos; $D2_t$, componente de disturbios exógenos; Q , una variable binaria que indica la existencia de perturbaciones; y E_t , variaciones aleatorias en el crecimiento radial no explicadas por los otros factores (Fritts, 1976; Cook, 1985). En resumen, el ancho de anillo anual se podría expresar como:

$$R_t = A_t + C_t + QD1_t + QD2_t + E_t$$

La variable C_t , reviste una gran importancia en el análisis del crecimiento radial, pues una parte muy importante de la variación anual en el ancho de los anillos puede ser explicada por las condiciones climáticas. Tanto es así que no sólo afecta el clima durante la etapa de crecimiento del árbol, sino que también influyen las condiciones climáticas previas al desarrollo del árbol (Bogino, 2005).

Los disturbios endógenos son resultado de los procesos internos del rodal, por ejemplo, la muerte de algunos individuos que producen liberaciones o supresiones en el crecimiento de los árboles de alrededor y que no están relacionadas con el clima. Los disturbios exógenos dependen de fuerzas ambientales externas, a saber, el fuego, las tormentas severas, y las plagas y enfermedades. Estas perturbaciones introducen un desvío persistente en el crecimiento de un árbol de tal manera que se muestra diferente a lo que cabría esperar al considerar únicamente su tendencia biológica y el clima (Bogino, 2005).

Según el objetivo del estudio, se puede mostrar más o menos énfasis en algunas de las variables de la función de crecimiento. En este caso, aquellas que no cobran interés para el trabajo, son consideradas como “ruido” en la señal que nos interesa estudiar; por ello existen numerosas técnicas que potencian la señal que nos interesa y reducen, en la medida de lo posible, el “ruido” que la “ensucia” (Bogino, 2005; Speer, 2010).

La posibilidad de reconstruir las variaciones del clima de épocas pasadas ha otorgado, en el contexto actual de cambio climático, todavía más relevancia a los análisis de los anillos de árboles. Esta rama dentro de la dendrocronología, se denomina dendroclimatología y requiere de la existencia de especies con anillos anuales visibles que tengan un crecimiento influenciado, directa o indirectamente, por las variaciones climáticas (Fritts, 1976). Los anillos de crecimiento demarcados son característicos de las especies arbóreas y arbustivas que crecen en las regiones templadas y frías, donde la estacionalidad climática es fuerte y donde los árboles realizan una parada vegetativa condicionada por las bajas temperaturas invernales.

2. ANTECEDENTES

2. Antecedentes

Una revisión breve de la historia de la dendrocronología da buena cuenta de la importancia de esta disciplina a lo largo de la historia: el primer vestigio histórico de esta ciencia data del año 322 AC, cuando el griego Therophrastus postuló la idea de que los árboles producen anillos de crecimiento todos los años; casi dos mil años más tarde, a finales de 1400, Leonardo da Vinci describió en el *Trattato della Pittura* la formación anual de estos anillos y sugirió que tenían relación con las condiciones climáticas; un siglo después, en torno a 1580, Michel de Montaigne planteó la posibilidad de obtener la edad de los árboles al contar los anillos de crecimiento (Speer, 2010). A partir de estos primeros descubrimientos esta ciencia fue ganando popularidad, en el siglo XVIII se realizaron importantes estudios sobre árboles congelados y en el siglo XIX se profundizó ampliamente en los conocimientos sobre anillos. Sin embargo fue en el siglo XX cuando la dendrocronología cobró más importancia; Andrew Elicott Douglass, para muchos el padre de la dendrocronología, desarrolló el cofechado como una herramienta fundamental y realizó numerosas cronologías, además en 1937, creó el primer laboratorio de investigación enfocado al estudio de los anillos de los árboles (Speer, 2010).

La mayoría de los análisis anteriores, a pesar de su relevancia, se limitaron casi de forma exclusiva al hemisferio norte y estaban enfocados al estudio de coníferas. El primer estudio dendrocronológico en el hemisferio sur fue realizado por Fisher y Krebs en 1931 precisamente sobre *Prosopis caldenia*. Estos investigadores, alarmados por una fuerte sequía en los años anteriores, intentaron sin éxito establecer una relación significativa entre el crecimiento y las precipitaciones anuales. A pesar de no obtener los resultados esperados, es gracias a ellos que empieza la historia de la dendrocronología en las frondosas de Argentina.

Después de este primer intento hubo un parón de más de 50 años que llega hasta la década de los 80, cuando Villalba (1985) y Villalba y Boninsegna (1989) en un trabajo sobre *Prosopis flexuosa*, retoman los estudios dendrocronológicos con especies del género *Prosopis*. Tras ellos vinieron otros estudios sobre *Prosopis flexuosa* en la provincia de Mendoza (Villagra y Villalba, 2002; Villagra *et al.*, 2005) y sobre *Prosopis ferox* Griseb, en la provincia de Jujuy (Morales *et al.*, 2001).

Los estudios sobre *P. caldenia* también han ido en aumento desde la década de los 90, los trabajos de Peinetti *et al.* (1994) y de Dussart *et al.* (1998) abren las líneas de investigación para esta especie en la provincia de La Pampa, determinando tendencias de crecimiento en distintas masas de caldén. En esta misma provincia se enmarcan los trabajos de Medina (2007 y 2008) en los que se centra en analizar el efecto del fuego en el caldenal pampeano a través del análisis de las cicatrices que

quedan en la madera. Dussart *et al.* (2011) realizaron una reconstrucción del paisaje del caldenal en la Pampa durante 250 años, y Velasco (2012) evaluó la influencia del fuego en la dinámica de estos bosques, ambos a partir de rodajas de caldén.

En concreto en la provincia de San Luis, los estudios sobre *P. caldenia* fueron más tardíos pero en los últimos 15 años han proliferado con más asiduidad. El primer acercamiento lo realizaron Medina *et al.* (2000), cuando desarrollaron una reconstrucción de la frecuencia de fuegos en un bosque de caldén al sur de la provincia de San Luis. Años más tarde Bogino (2005) analizó el crecimiento radial, el turno biológico y el potencial dendroclimático de esta especie; lo que le convierte en el primer trabajo que relaciona el crecimiento con el clima en esta provincia. Bogino y Jobbagy (2011), también con técnicas dendroclimáticas, analizaron las diferencias entre bosques de caldén situados en zonas bajas y situados en zonas altas, obteniendo resultados sobre la influencia de la capa freática sobre el crecimiento de estos árboles.

Como se puede apreciar, el número de estudios que relaciona el crecimiento del caldén con las variables climáticas es todavía escaso, por lo que es necesario seguir profundizando en dichos conocimientos. Generalmente, los estudios de este tipo enfrentan contra el clima unos valores de crecimiento medios del conjunto de la masa, es decir, se basan en una simplificación de las dinámicas individuales de los árboles. Un artículo reciente publicado en Italia (Carrer, 2010), hizo una crítica constructiva a los tradicionales métodos de la dendrocronología y sugirió que debía considerarse el análisis individual frente a las variables climáticas a tenor de los ciclos vitales cambiantes de los árboles como seres vivos que son. En su análisis sobre *Larix decidua* Mill. y *Pinus cembra* L. encontró tendencias individuales interesantes y profundizó en los efectos del clima sobre la variabilidad en el crecimiento de las especies.

Considerando la importancia histórica y ecológica del bosque de caldén, la situación crítica que atraviesa por el avance de la frontera agrícola, la necesidad de incrementar los conocimientos sobre su especie dominante en el actual contexto de cambio global, y los estudios previos que informan sobre valor que tiene la respuesta individual de los árboles a los factores ambientales, se propone esta investigación que pretende abordar: las dinámicas de crecimiento del caldén en función de la densidad del rodal y la respuesta de los individuos a las variables climáticas.

Nótese aquí la relevancia y actualidad de este trabajo, tanto a nivel regional y nacional por tratar de ampliar la información sobre el comportamiento del caldén en los bosques de la región semiárida de Argentina, como a nivel internacional por seguir profundizando en el conocimiento de las respuestas climáticas de los árboles individuales.

3. OBJETIVOS

3. Objetivos

3.1. Objetivos generales

El objetivo general de este trabajo final de máter es:

1. Determinar la dinámica de crecimiento y la respuesta individual de *Prosopis caldenia* a las variables climáticas (precipitación y temperatura) en los bosques de la región semiárida de Argentina.

3.2. Objetivos específicos

Los objetivos específicos que se proponen para la consecución del objetivo general que acabamos de definir son:

- a. Construir las curvas de crecimiento de *P. caldenia*, sujeto a distintas densidades, para una misma estación.
- b. Comparar entre el 'máximo potencial de crecimiento' de la especie en la zona de estudio -árboles sin competencia- y el crecimiento en masas cerradas.
- c. Estimar la respuesta, ante las variables climáticas, de ejemplares de *P. caldenia* ubicados en rodales con densidades contrastantes.
- d. Analizar si existen diferencias significativas en la respuesta al clima entre ejemplares desarrollados con competencia y sin competencia.
- e. Reconfirmar el potencial dendrocronológico del caldén en el extremo norte de su distribución mundial.

4. MATERIAL Y MÉTODOS

4. Material y métodos

4.1. Zona de estudio

Se establecieron dos sitios de muestreo en el área del bosque de caldén en la provincia de San Luis, Argentina, en el límite norte de su distribución natural ($33^{\circ}47'27.42''\text{S}$, $65^{\circ}32'59.45''\text{O}$) (Figura 4A).

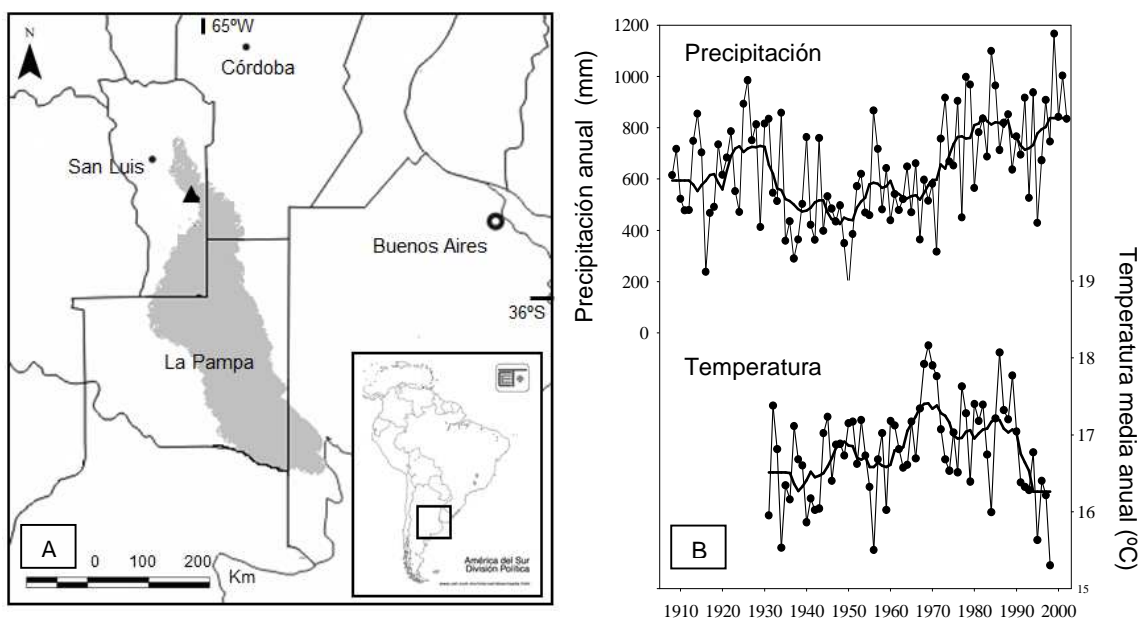


Figura 4. Zona de estudio (triángulo negro) en el distrito del caldenal (área gris) para la estimación de la respuesta individual del caldén a las variables climáticas (A). Tendencias de precipitación anual y temperatura media anual (San Luis) (de Bogino y Jobbágy, 2011) (B).

El sector norte del caldenal ocupa una llanura medanosa con pendientes del 1 al 3% que dan lugar a un paisaje suavemente ondulado (SAyDS, 2007). Los suelos están clasificados principalmente como Haplustoles, son profundos, con un pH de 7.5 a 6.5 (moderadamente alcalinos – levemente ácidos), alto contenido de arena, baja materia orgánica y excesivamente drenados. Son suelos poco evolucionados y con escasa estabilidad estructural, por lo que son bastante susceptibles a la erosión eólica e hídrica, pudiéndose encontrar dunas arenosas en bastantes áreas de la región. Suelen presentar también carbonato de calcio, ya sea diseminado o formando sedimentos (Cano, 1980; Boyero, 1985; Peña Zubiarte et al., 1998).

Ambas zonas de muestreo pertenecen a la cuenca hidrográfica del río Quinto o Popopis, el cual nace en las Sierras de San Luis y posee un caudal medio de $5\text{m}^3/\text{s}$. En veranos muy lluviosos puede alcanzar los $1000\text{m}^3/\text{s}$ y originar crecidas peligrosas (SAyDSs, 2007).

El clima, según la clasificación de De Fina y Ravelo (1975) es templado y semiárido, con grandes amplitudes térmicas y precipitaciones estacionales. La temperatura media anual (Figura 4B) varía, de norte a sur, entre los 16 y los 15° C. Enero es el mes más cálido con temperaturas promedio entre 23 y 25° C, mientras que julio es el mes más frío con una temperatura media de 7° a 9° C. La existencia de una gran amplitud térmica estacional, queda patente al comprobar las máximas y mínimas absolutas: 45,7° C en verano y -14,1° C en invierno. La época de heladas se extiende durante los meses de abril a noviembre. (SAyDS, 2007)

Los bosques de Caldén se distribuyen entre las isohietas de 300 mm/año al extremo oeste y de 600 mm/año cerca del límite oriental. Esta zona de estudio tiene una media anual de 594 mm, de los cuales aproximadamente el 80% precipitan entre noviembre y marzo (Risio, 2012). El diagrama climático de la Figura 5 permite comprobar que en la región existe también un importante déficit hídrico durante 6 o 7 meses al año.

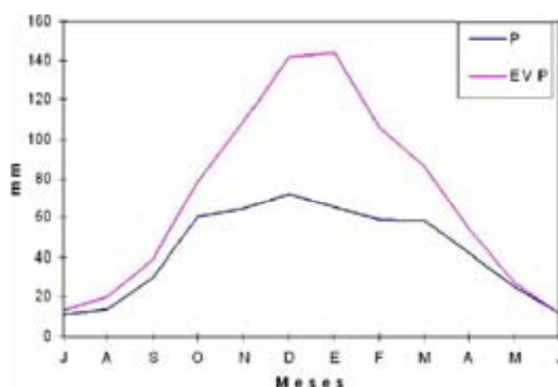


Figura 5. Balance hídrico región del caldenal (Nueva Galia, San Luis). P: Precipitación. EVP: Evapotranspiración potencial (de Barbosa, 2005).

Los vientos son más intensos durante la primavera y predominan los de dirección noreste (cálidos y húmedos) y suroeste (fríos y secos). La velocidad media anual es de 10 km/h (Cano, 1980).

4.1.1. Los rodales

Los rodales utilizados para la toma de datos están enclavados en un monte de propiedad privada en plena reconversión de superficie forestal a cultivo agrícola, siguiendo la tónica general del resto del distrito del caldenal (SAyDS, 2007). Se encuentran aproximadamente 20 km al sur de la ciudad de Villa Mercedes (San Luis). Si bien las características generales son las mismas en las dos localizaciones, existen algunas especificaciones que es necesario explicar antes de seguir avanzando en el trabajo.

Los ejemplares del primer rodal crecieron en densidad los primeros años pero fueron liberados, probablemente en torno al año 1950, para establecer un cultivo agrícola en el resto de la superficie. Desde ese momento se puede considerar que

tuvieron un desarrollo aislado, sin competencia (Figura 6A). Años más tarde los caldenes restantes fueron eliminados para el mismo fin con el que fueron liberados: homogeneizar la superficie para el cultivo agrícola. Por el contrario los pies del segundo rodal analizado pertenecieron al estrato dominante y siempre formaron parte una masa boscosa, por tanto han estado sometidos a competencia (Figura 6B). En la Figura 7 se puede ver una proyección temporal del área analizada: una foto aérea del año 1961 (Figura 7A), en la cual se aprecia como el primer sitio de muestreo mencionado ya había sido liberado y apenas conservaba algunos caldenes en pie y como el segundo de ellos, con una vocación más forestal, mantenía una densidad superior y en claro aumento. La comparación se completa, en la Figura 7B y 7C, con una ortofoto del año 2004, en la que aún permanecían en pie los árboles de ese rodal y en la que se puede apreciar el buen desarrollo forestal del otro; y por último una ortofoto actual, donde los pies del primero han sido eliminados y la masa del segundo se ha cerrado completamente.

Para una mejor comprensión a lo largo del estudio nos referiremos a estos rodales según el código identificativo de cada paquete de muestras, que está compuesto por las iniciales del propietario delante de un número de referencia. De esta manera las comparaciones y/o referencias de cada rodal, que serán continuas durante el desarrollo de este trabajo, se podrán asimilar más fácilmente. Resumiendo, la denominación a partir de ahora será:

- SR100; para el rodal con árboles libres de competencia.
- SR200; para el rodal cuyos árboles han crecido en competencia.

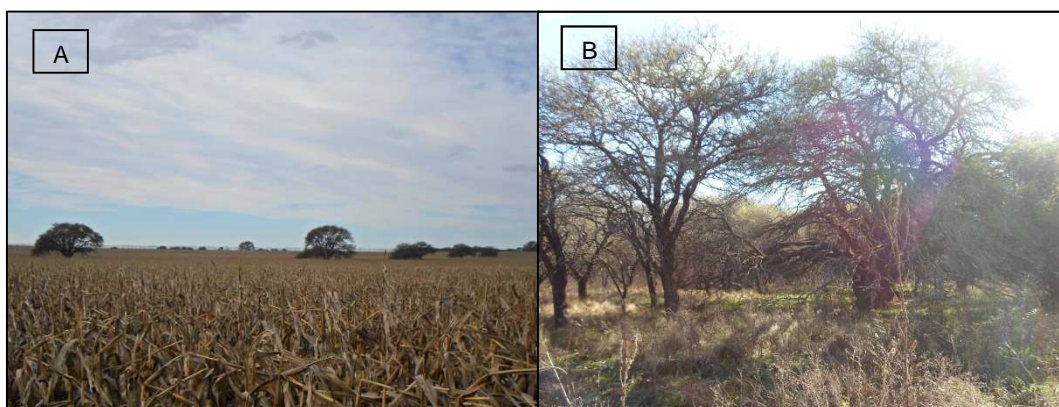


Figura 6. Fotografía de una situación muy similar a la de los caldenes que fueron cortados en SR100 para este estudio (A). Fotografía perteneciente a SR200 que da cuenta de las condiciones de desarrollo en este rodal (B).

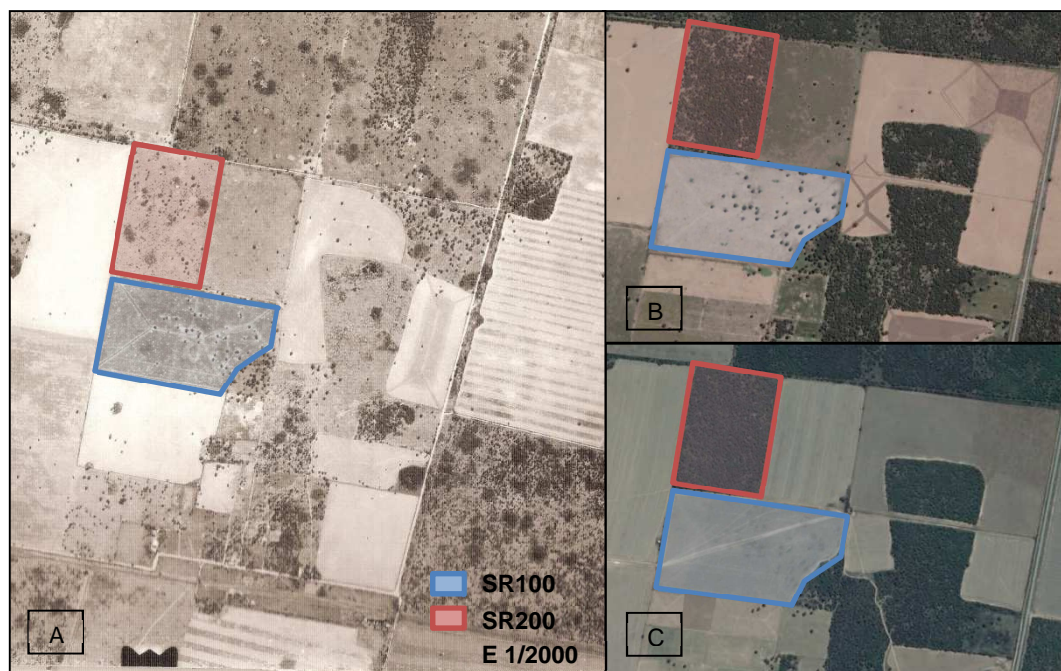


Figura 7. Evolución de los rodales de muestreo a través del tiempo. Año 1961 (SGM – Servicio Geográfico Militar) (A). Año 2004 (Google Earth) (B). Año 2013 (Google Earth) (C).

Ambas zonas, como se puede comprobar en la Tabla 1, tienen una superficie muy similar. SR100 tiene una forma trapezoidal y cuenta con 33 ha destinadas a agricultura. SR200, en cambio, es rectangular, ligeramente menor en cuanto al número de hectáreas y permanece como terreno forestal.

Tabla 1. Características principales de los rodales de estudio.

Rodal	Propietario	Coordenadas		Vocación	Superficie (ha)	Densidad (pies/ha)*
		Latitud	Longitud			
SR100	Sergio Rosa	33°47'34.81"S	65°33'2.03"O	Agrícola	33	1,6
SR200	Sergio Rosa	33°47'16.92"S	65°33'5.38"O	Forestal	26	414

*: Densidad en el momento de la corta

4.2. Metodología de trabajo

4.2.1. Las muestras

Para obtener los datos que posteriormente se analizaron en este trabajo, se han obtenido rodajas basales de pies de *P. caldenia* procedentes, como ya se ha indicado, de dos rodales diferentes:

- El primer grupo de muestras lo clasificamos como SR100 y consta de 8 rodajas parcialmente completas. Fueron cortadas para facilitar su maniobrabilidad a la

hora de la medición por lo que se trabajó con un cuarto de rodaja en la mayoría de los casos. Este primer grupo se cortó en el año 2009.

- El segundo grupo, clasificado como SR200, está formado por un total de 10 de rodajas en forma de banda; esto es, cortadas con una sierra de banda de lado a lado de la rodaja, incluyendo la parte central, con un ancho de unos 20/25 cm. Estos pies fueron apeados en el año 2000.

En la Figura 8 se pueden ver dos imágenes, a modo de ejemplo, con el fin de que se aprecie más claramente la diferencia entre las muestras “parcialmente completas” y las muestras en “forma de banda”.

4.2.2. Preparación de las muestras

La preparación de las muestras se realizó en dos fases:

- Fase 1: se lijó cada una de las rodajas con una lijadora de banda utilizando grano progresivamente más fino. De este modo se facilitó la posterior identificación de los anillos de crecimiento (Fotografía 1. Anejo I).
- Fase 2: tras el lijado se limpiaron las rodajas con un compresor de aire (Fotografía 2. Anejo I). Quitarles el polvo y el serrín residuales tras el lijado permite apreciar mejor los vasos de los anillos y consecuentemente identificar los anillos de crecimiento.

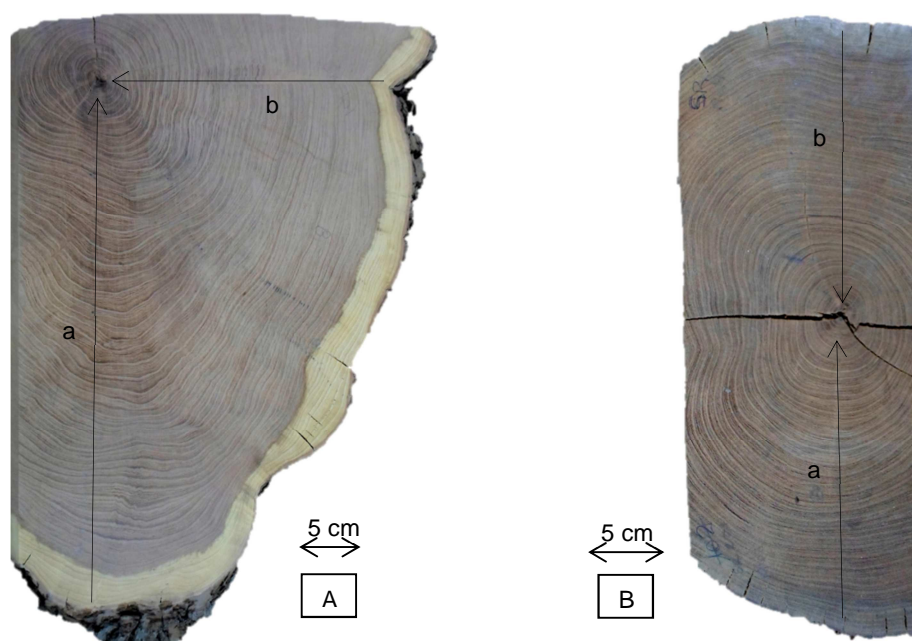


Figura 8. Cuarto de rodaja de la pieza SR101 y caminos de fechado perpendiculares a y b (A). Pieza SR201 en forma de banda y caminos de fechado opuestos a y b (B).

4.2.3. Análisis de laboratorio

El trabajo en laboratorio comenzó con el fechado de los anillos de crecimiento de acuerdo con la metodología propuesta por Stokes y Smiley (1968). Éste se realizó, con ayuda de una lupa estereoscópica marca Olympus, modelo SZ61 (0,9 a 4X), sobre dos radios distintos en cada una de las secciones transversales (Figura 8). Es importante remarcar que muchas de las secciones presentan deformaciones o crecimientos asimétricos por efectos del fuego o del viento, lo cual complica la tarea del fechado.

En el hemisferio sur existe la particularidad de que el crecimiento radial de los árboles se produce durante el transcurso de dos años calendario (Septiembre-October/Abril-Mayo). Es por esto que para la datación de las rodajas se estableció como fecha calendario el año en que comenzó a formarse el anillo; siguiendo así lo convenido entre los dendrocronólogos a nivel internacional (Schulman, 1956).

Los anillos de crecimiento se midieron, con una precisión de 0,01 mm, utilizando un equipo de medición Unislide TA 4020H1-S6 Velmex (Fotografía 3. Anejo I). Con la aplicación Measure J2X se almacenó la información en el ordenador mediante archivos '.txt', siguiendo un formato "decadal".

La Figura 9 ilustra la estructura leñosa de *P. caldenia* a partir de un corte transversal como los que se han utilizado en nuestro trabajo. Se observa la marcada diferencia entre el leño temprano, con vasos de gran tamaño, y el leño tardío, con vasos más pequeños y un mayor porcentaje de parénquima. De esta manera es más sencillo hacerse una idea de cómo se visualizan las delimitaciones de los anillos de crecimiento al microscopio en las rodajas de caldén. Además pueden reconocerse tres elementos constitutivos mayores: vasos, parénquima y fibras.

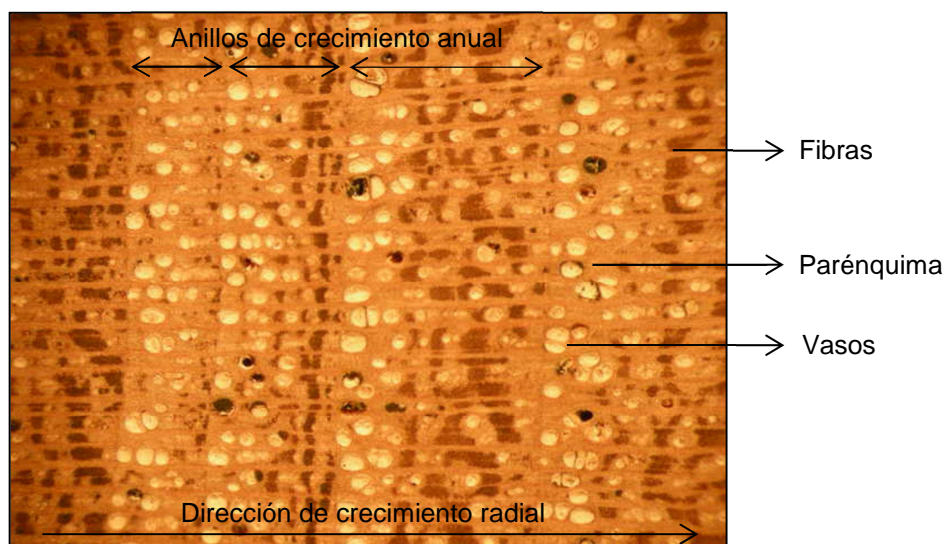


Figura 9. Descripción de la estructura leñosa de *P. caldenia*. Se aprecian los anillos de crecimiento y los elementos constitutivos mayores. En la parte inferior se marca la dirección del crecimiento radial (hacia la izquierda, más antiguo; hacia la derecha, crecimiento reciente).

4.2.4. Cofechado y liberaciones

El análisis de las mediciones es fundamental, pues conocer con exactitud el año de la formación de los anillos es algo imprescindible siempre que se quiera comparar los anchos de los anillos medidos con cualquier variable del entorno (Bogino y Villalba, 2008).

Cumpliendo con lo anterior, evaluamos la calidad del fechado y de las mediciones con el programa COFECHA v6.06P (Holmes, 2001). Este programa calcula el coeficiente de correlación de Pearson entre cada cronología de ancho de anillos indexada y una cronología maestra de referencia, generada a partir del conjunto de datos conformado por la totalidad de las cronologías individuales. La correcta sincronización de las muestras, evaluada a través de los coeficientes de correlación, confiere el soporte estadístico necesario para un correcto fechado de los anillos (Grissino-Mayer, 2001).

Para el tratamiento y la corrección de algunos de los datos se utilizó el programa DPL (Dendrochronology Program Library) (DPL program, <http://www.ltrr.arizona.edu>). Éste tiene numerosas funciones, en concreto nosotros hemos utilizado la función 'YUX' para exportar las cronologías a tablas de 'Excel' y la función 'EDT' para editar las series de datos que así lo requerían.

Finalmente, se estudiaron las posibles liberaciones que pudieran acontecer en las cronologías analizadas siguiendo la metodología propuesta por Nowacki y Abrams (1997). Esto se realizó mediante el programa estadístico JOLTS (Holmes, 1999), el cual aplica la fórmula: $GC = (M2-M1)/M1$; donde: GC = porcentaje de crecimiento en el año j; M1 = la media de crecimiento durante los anteriores 10 años y M2 = la media crecimiento durante los siguientes años. Las prescripciones que se establecieron fueron: liberaciones de más del 50% (relfactor > 1,5) con una continuidad en el tiempo de, al menos, 2 años.

4.2.5. Crecimientos radiales

La primera fase del análisis estadístico se llevó a cabo utilizando el programa Microsoft Excel 2010. Se calculó el tamaño anual de los anillos de crecimiento, para todas las series, a partir del promedio de los dos caminos efectuados en cada rodaja. Con ello se calculó y graficó el crecimiento acumulado para cada árbol individual y el crecimiento acumulado medio de ambos rodales. Con estos mismos datos hallamos los crecimientos corrientes y los crecimientos medios, para posteriormente comparar y evaluar de forma gráfica sus tendencias.

La segunda fase se realizó con el programa R (R Core Team, 2013), se comparó mediante una correlación de Pearson la relación entre tendencias de crecimiento y edad del árbol, y se comprobó la existencia de diferencias significativas entre el crecimiento medio de los ejemplares que crecieron sin competencia (SR100) y los que crecieron con competencia (SR200) para el período de años en común. Para esto último se verificó mediante el test de Shapiro-Wilk que las distribuciones fueran normales, se ejecutó el test de Bartlett para verificar la homogeneidad de varianzas y, por último, se realizó una prueba T. Por último, se completó este análisis con

información gráfica: histogramas, diagrama de caja y bigotes y gráfico QQ normal. Los comandos ejecutados están disponibles en el “Anejo II. Comandos de R: crecimientos radiales”.

4.2.6. Análisis dendroclimático

Merece la pena dedicar un epígrafe a parte para la última fase del análisis estadístico, el análisis dendroclimático, que consiste en averiguar las relaciones entre el crecimiento radial de los anillos y las variables climáticas. Fue ejecutado completamente con el programa R (R Core Team, 2013), pueden consultarse los comandos utilizados en el “Anejo III. Comandos de R: análisis dendroclimático”.

Para eliminar la tendencia biológica de crecimiento y minimizar el efecto de las variaciones que no son comunes en todos los árboles, se utilizó el paquete “Dendrochronology Program Library in R” (DplR) (Bunn et al, 2012). Este paquete permite, entre otras cosas, generar cronologías estandarizadas del rodal y de los árboles individuales. De esta manera se maximiza la variabilidad de alta frecuencia (año a año), generalmente asociada a factores ambientales (Cook, 1985). DplR dispone de varios tipos de estandarización; en este trabajo se ha preferido utilizar el método de suavizado con una función spline cúbica, siguiendo las recomendaciones de Speer (2010), donde asegura que ésta se adapta mejor al crecimiento de los primeros años. La Figura 10 muestra, a modo de ejemplo, la serie original SR101b con las proyecciones de ambos métodos superpuestas; más abajo está el resultado de la estandarización por el método “smoothing spline” y “negative exponential curve”. Nótese que la curva verde (spline) se ajusta más al crecimiento real del árbol que la curva roja (negative exponential).

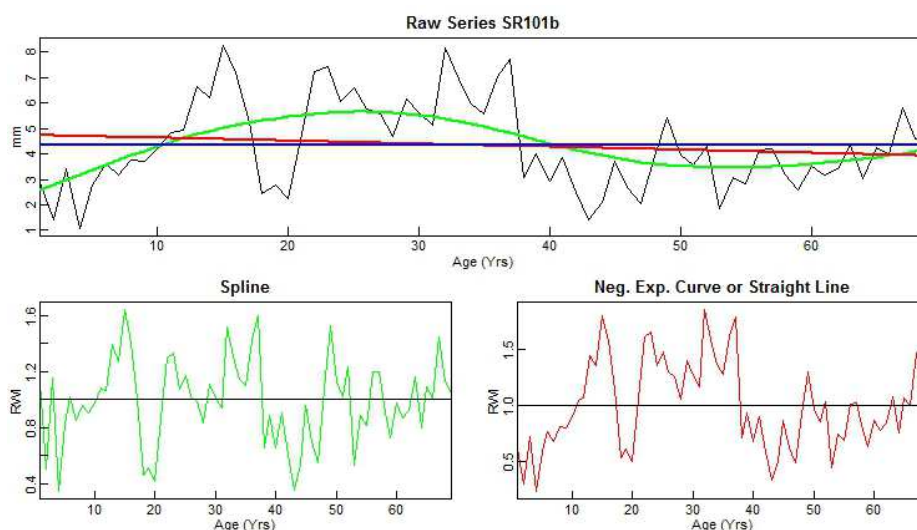


Figura 10. Cronología original de la muestra SR101b y las posibles estandarizaciones: curva verde (suavizado con función spline cúbica) y curva roja (curva exponencial negativa). Resultado de la estandarización por método spline y por el método exponencial negativo.

Este tipo de estandarización transforma un conjunto ruidoso de observaciones (crecimiento radial anual) en una curva suave (tendencia de crecimiento); para ello calcula la tendencia de crecimiento (G_t) como una función spline con una respuesta de frecuencia igual al 50% cada 'n' años. En este caso, 'n' vale 2/3 la longitud de las series (Bunn, 2008).

El proceso de estandarización transforma finalmente todas las series de ancho de anillos en índices adimensionales (RWI; ring-width índices) que son calculados mediante la división entre crecimiento actual y crecimiento esperado en el instante 't': $RWI_t = R_t/G_t$ (Bunn, 2008). De esta manera es posible construir una cronología de valor medio para cada rodal o individuo promediando los RWI anuales. Se generaron 19 cronologías residuales, una por cada árbol individual (17) y una por cada rodal (2).

Cada una de las 19 cronologías residuales generadas se comparó con los datos climáticos. Para ello se utilizaron las funciones de correlación, basadas en coeficientes de correlación de Pearson entre los índices de crecimiento y cada una de las variables climáticas, disponibles en el paquete de R "bootRes" (Zang, 2012).

Las variables climáticas utilizadas fueron: precipitación media mensual, temperatura media mensual, temperatura media de las máximas y temperatura media de las mínimas. El crecimiento radial suele estar influenciado por las condiciones climáticas del período anterior al de la formación del anillo (Speer, 2010), por lo que la ventana de correlación clima-crecimiento abarcó un total de 13 meses, desde junio del invierno anterior al crecimiento hasta junio del período de formación del anillo.

Los datos climáticos requeridos no se encontraban disponibles en un solo observatorio por lo que fue necesario acudir a dos observatorios, la distancia entre ambos es de 6 km por lo que no afectó al resultado (Figura 11). Los registros meteorológicos de precipitación (1903-2010) y temperatura media (1931-2009) pertenecen a la estación meteorológica del INTA en Villa Mercedes (33°40'4.69"S, 65°24'47.25"O); los de temperatura máxima (1959-2010) y temperatura mínima (1959-2010) se obtuvieron de la estación de Villa Reynolds (33°42'58.16"S, 65°22'58.76"O).



Figura 11. Localización de los observatorios meteorológicos (marca circular) con respecto a la zona de estudio (marca cuadrangular) y a la ciudad de Villa Mercedes (mancha gris) (Google Earth).

5. RESULTADOS

5. Resultados

Las rodajas analizadas de *Prosopis caldenia* poseen numerosas anomalías que dificultaron su correcta datación, por ejemplo: la presencia de galerías de cerambícidos (figura 12A) y las abundantes cicatrices por fuegos (figura 12B); además fue una limitación el hecho de trabajar con rodajas tan grandes por lo costoso que resulta mantener la perpendicularidad a la hora de medir los anillos.

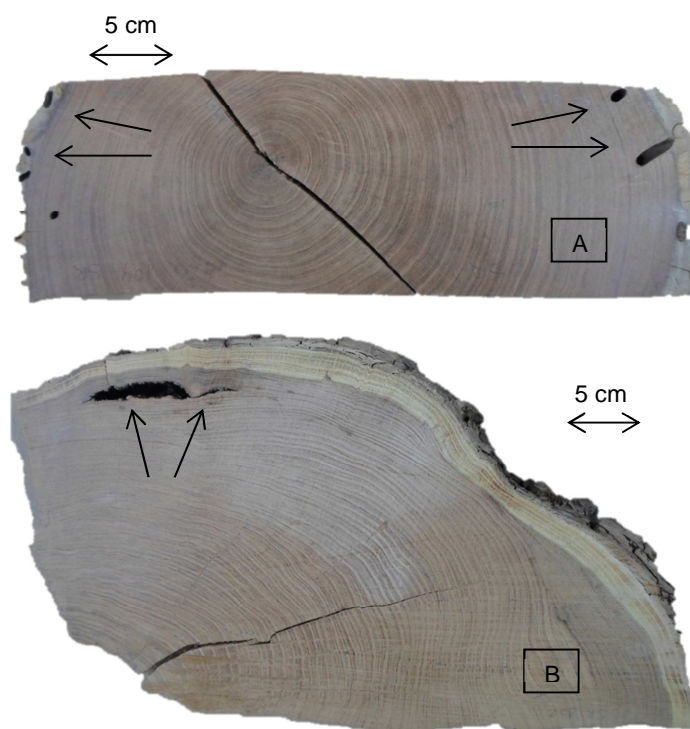


Figura 12. Galerías de cerambícidos en una muestra de *Prosopis caldenia* del rodal SR200 (A). Daños por fuego en una rodaja de SR100 (B). Las flechas señalan las anomalías mencionadas.

La datación más longeva, año 1908, corresponde al árbol SR204, y la más joven, año 1967, al árbol SR203; ambos pertenecientes al rodal SR200. El ancho de anillo más grande fue de 14,63 mm en la muestra SR108 (rodal SR100) y el más pequeño de 0,21 mm para SR202 (rodal SR200). Se encontró un anillo ausente en el camino 'b' de la rodaja SR103.

Los datos más relevantes de cada uno de nuestros grupos de muestras se recogen a continuación en la Tabla 2.

Tabla 2. Resumen de la datación y medición de dos grupos de muestras de *Prosopis caldenia* en la provincia de San Luis.

Rodal	Año de corta	Nº rodajas	Dat. joven	Dat. longeva	Mín (mm)	Máx (mm)	Anillos ausentes	Años común
SR100	2009	8	1951	1933	0,59	14,63	1	60
SR200	2000	10	1967	1908	0,21	14,52	0	35

* Dat. joven = datación joven (año de nacimiento del árbol más joven del rodal).

* Dat. longeva = datación longeva (año de nacimiento del árbol más longevo del rodal).

* Mín (mm) = ancho de anillo más pequeño.

* Máx (mm) = ancho de anillo más grande.

5.1. Cofechado y liberaciones

Los resultados obtenidos tras el cofechado de las muestras permiten dilucidar que existe una señal común de variabilidad entre las series (Tabla 3). Se obtuvieron valores satisfactorios de correlación y de sensibilidad media, esto es, del grado de variación entre anillos de crecimiento consecutivos, tanto para las muestras SR100 como para SR200. Se pudieron cofechar 17 rodajas de árboles de caldén con sus correspondientes caminos; la muestra SR201 pudo ser datada al microscopio pero no cofechó con el resto por lo que fue descartada para los análisis dendrocronológicos a fin de minimizar el error en la serie maestra. En el "Anejo IV. Tabla resumen de árboles individuales" pueden verse los resultados del cofechado de cada árbol individual.

La intercorrelación entre las 16 series de SR100 fue de 0,310, con una sensibilidad media de 0,206. El número total de anillos analizados ascendió a 1100 para un período de 77 años (1933-2009). En el caso de SR200 el valor de intercorrelación entre las 18 series alcanzó 0,504, siendo la sensibilidad media de los 1230 anillos de 0,365. La cronología máster esta vez cubrió un intervalo de 93 años (1908-2000).

Tabla 3. Características dendrocronológicas para dos rodales con distintas densidades de *Prosopis Caldenia* en la provincia de San Luis.

Rodal	Árboles cofechados	Anillos datados	Período (años)	Longitud media (años)	Correlación	Sensibilidad media
SR100	8/8	1100	77	68,8	0,310	0,206
SR200	9/10	1230	93	68,3	0,504	0,365

El análisis de liberaciones refleja una fuerte liberación en el rodal SR100 entre 1948 y 1960, por el contrario en este periodo en SR200 las liberaciones son más someras, siendo éstas más fuertes antes y después de ese período, es decir, la primera entre 1938-1943 y la segunda entre 1971-1976. En la Figura 13 encontramos las tendencias suavizadas de las liberaciones cada 5 años junto con la fecha de las instalaciones de los individuos.

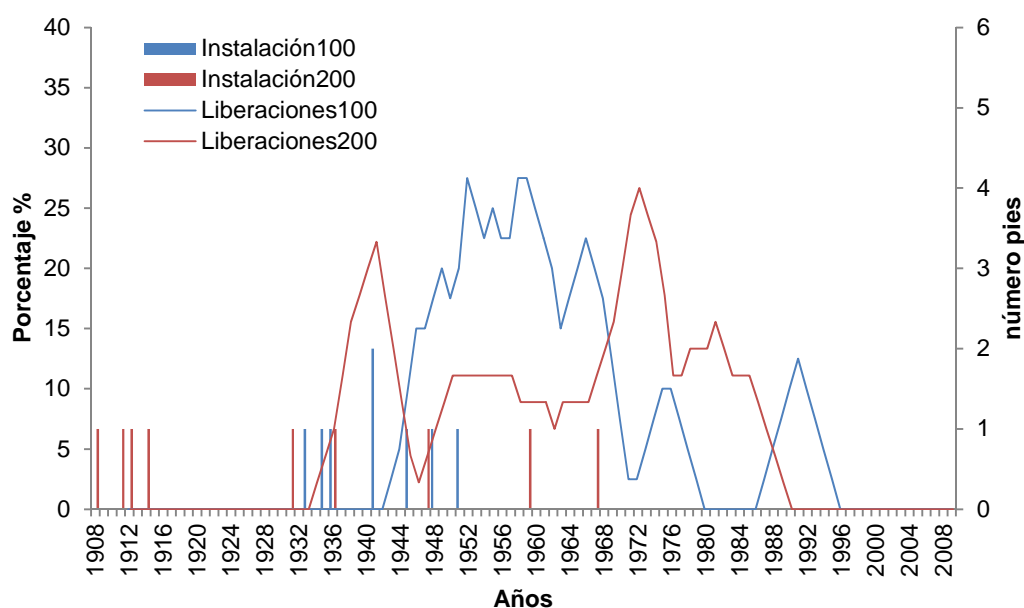


Figura 13. Tendencias porcentuales de las liberaciones suavizadas por medias móviles de 5 años para los rodales SR100 y SR200. En el eje secundario se indica el año de instalación de cada uno de los ejemplares.

5.2. Crecimientos radiales

El análisis de las curvas de crecimiento para SR100 (Figura 14) muestra que el crecimiento se ralentiza en torno a los 40 años de edad, momento en el cual el crecimiento corriente suavizado corta con la curva del crecimiento medio. Se aprecia además la tendencia de crecimiento de los árboles con el paso de los años, en las etapas juveniles el crecimiento es alto hasta llegar un máximo de 6,77 mm a los 15 años, después se mantiene en esos valores durante otros 15 años y comienza a disminuir. El mínimo valor se alcanza llegando a los 70 años y es de 3,13 mm.

Este mismo análisis aplicado a las muestras de SR200 (Figura 15) revela que la curva de crecimiento empieza a decrecer unos años antes, a los 37 años de edad. El máximo valor de crecimiento (5,19 mm) se alcanza también a los 15 años y el mínimo valor (1,01 mm) aparece al final del período de crecimiento, cerca de los 90 años.

Si comparamos entre ambos gráficos observamos que las cifras de crecimiento son superiores en el rodal sin competencia, siendo sus crecimientos máximos y mínimos mayores a los del rodal en competencia. En el primero, como hemos visto, es más tardío el momento de disminución del crecimiento que en el segundo, aproximadamente 3 años.

Se puede apreciar que tanto el crecimiento de SR100 como el de SR200 siguen tendencias muy similares a lo largo del tiempo: plenitud juvenil, estancamiento y progresivo decaimiento hasta la senectud. Esta relación entre el crecimiento y la edad del árbol resultó altamente significativa al realizar un análisis de correlación por el método de Pearson ($p < 0,001$; $R = 0,75$).

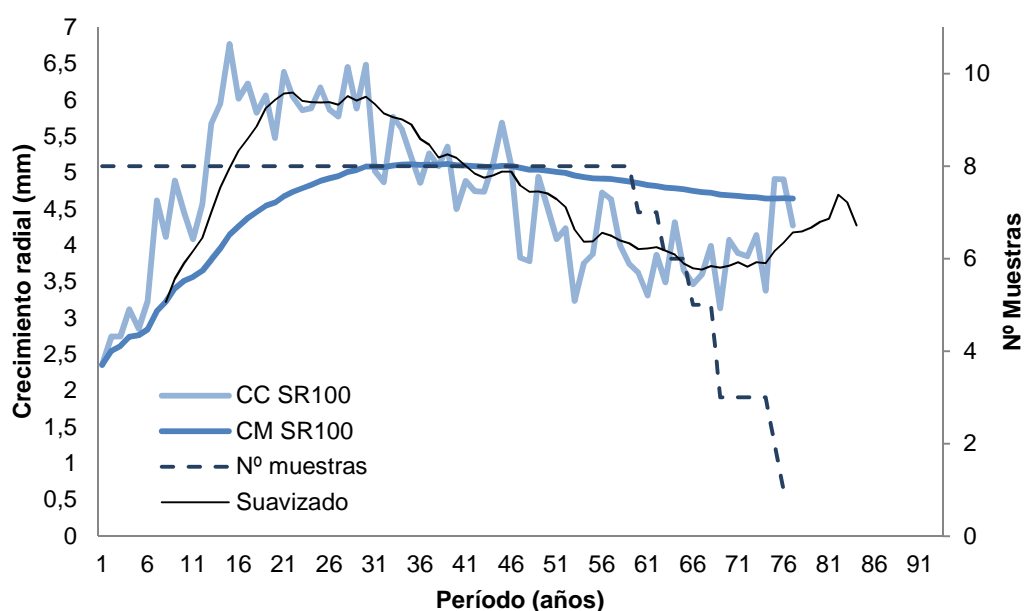


Figura 14. Curvas de crecimiento medio radial (CM), crecimiento corriente radial (CC) y crecimiento corriente suavizado por medias móviles de 8 años para una masa abierta (SR100) de *Prosopis caldenia* en la provincia de San Luis. En el eje secundario se indica el número de series utilizadas para construir la cronología.

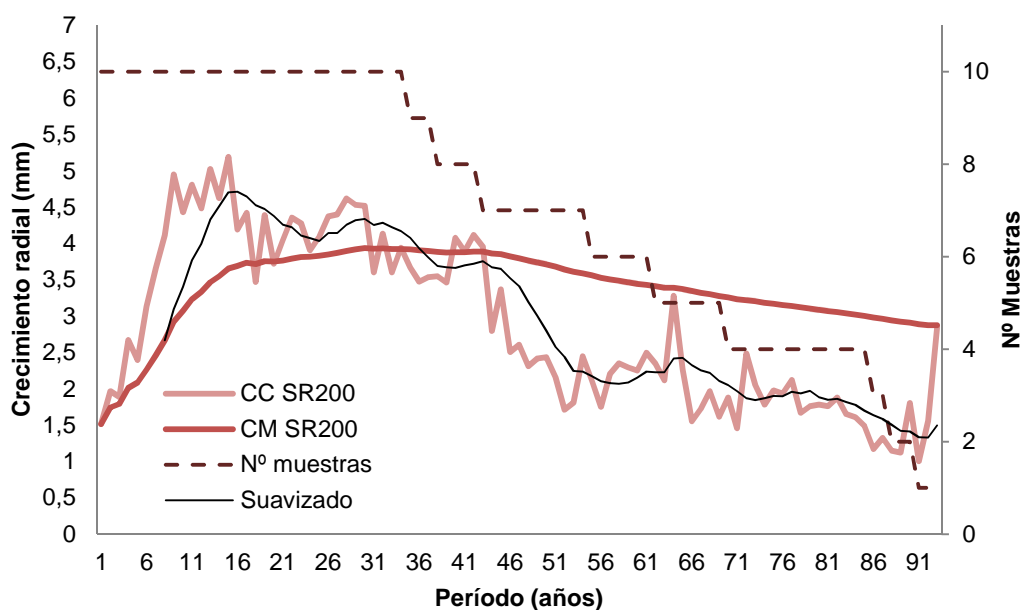


Figura 15. Curvas de crecimiento medio radial (CM), crecimiento corriente radial (CC) y crecimiento corriente suavizado por medias móviles de 8 años para una masa cerrada (SR200) de *Prosopis caldenia* en la provincia de San Luis. En el eje secundario se indica el número de series utilizadas para construir la cronología.

El análisis del crecimiento acumulado (Figura 16) corrobora la tendencia del crecimiento corriente: los valores medios e individuales de la masa abierta son mayores que en la masa cerrada. En la primera los valores individuales oscilan entre 239 mm de SR105 y 455 mm de SR108; el valor medio resulta de 357 mm. En la segunda éste valor apenas llega a 267 mm, variando entre 178 mm de SR209 y 334 mm de SR208. Como se puede observar hay dos árboles de SR200 que tienen un crecimiento por encima de la media, llegando a niveles propios de los ejemplares de la masa abierta. Los valores individuales de crecimiento pueden consultarse en el “Anejo IV. Tabla resumen de árboles individuales”.

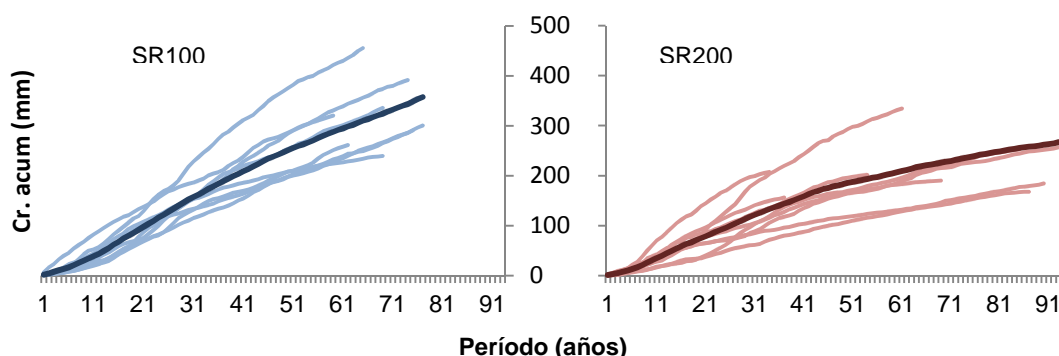


Figura 16. Crecimiento radial acumulado de *Prosopis caldenia* en SR100 y SR200. Las curvas finas y gruesas se corresponden con los crecimientos acumulados individuales y medios de cada rodal, respectivamente.

Los estadísticos descriptivos calculados aportan más claridad a lo que venimos comentando, el crecimiento anual promedio es mayor en el rodal abierto ($5,12 \text{ mm} \pm 1,20$) que en el cerrado ($3,94 \text{ mm} \pm 1,34$). En ambos rodales se aprecia una marcada variabilidad en las tasas de crecimiento entre individuos del mismo sitio. Esta información se completa con el diagrama ‘boxplot’ (Figura 17), en él se representa la mediana y los cuartiles para nuestros dos rodales.

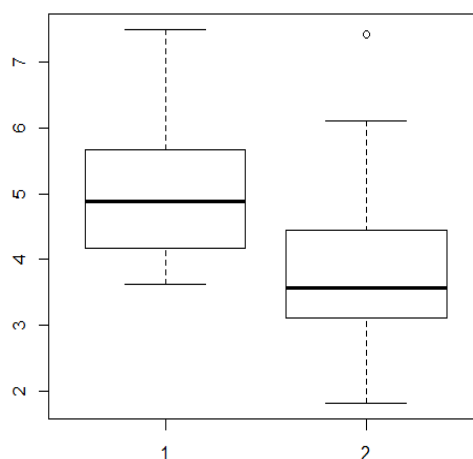


Figura 17. Representación gráfica de las medianas y desviaciones estándar del crecimiento radial medio de *Prosopis Caldénia*. 1: SR100. 2: SR200.

El test de normalidad de Shapiro-Wilk aplicado a los valores medios de crecimiento individual demostró que dicho supuesto se cumplía tanto para las muestras de SR100 ($w = 0,92$; p -valor = $0,158$) como para las de SR200 ($w = 0,93$; p -valor = $0,132$). También resultó favorable el test de homogeneidad de varianzas de Bartlett (K -cuadrado = $0,20$; p -valor = $0,66$). La normalidad, a su vez, fue verificada de forma gráfica mediante el diagrama 'normal qqplot' (Figura 18) en el que se ve cómo nuestros datos se ajustan claramente a la distribución normal.

La resultados de la prueba T confirman con un 99% de confianza que existen diferencias altamente significativas ($p < 0,01$) entre los crecimientos radiales medios de las dos situaciones que estamos analizando.

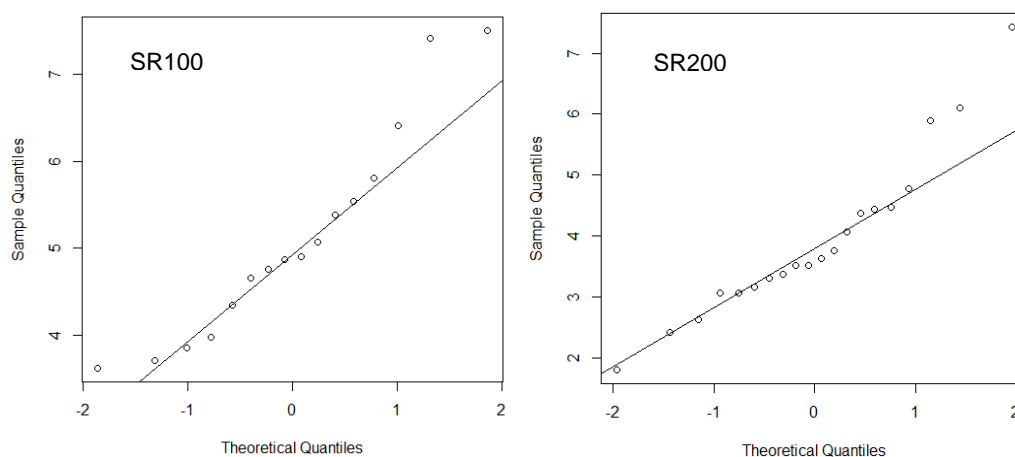


Figura 18. Gráfico 'Normal QQPlot' para verificar la normalidad de los crecimientos de dos rodales (SR100 y SR200) de *Prosopis caldenia* en la provincia de San Luis.

5.3. Análisis dendroclimático

5.3.1. Comparativa a nivel de rodal

Se encontraron diferentes asociaciones entre las cronologías de los rodales sin y con competencia y el clima (Figura 20). En el rodal SR100 no se encontró ninguna relación significativa entre el crecimiento y la precipitación, mientras que en SR200 apareció una relación negativa entre las lluvias de mayo y el crecimiento.

La temperatura media respecto al crecimiento medio radial mostró un efecto negativo en el mes de julio anterior al período de crecimiento y un efecto positivo en el mes de abril para SR100. En cambio no mostró ninguna relación para SR200.

Con respecto a las temperaturas máximas, el rodal sin competencia volvió a mostrar un efecto negativo en el mes de julio previo. El efecto positivo esta vez se desplazó hasta el mes de junio aunque se aprecia que conserva la tendencia positiva de abril. Para el rodal con competencia se encontraron efectos positivos de las temperaturas máximas sobre el crecimiento medio radial en el mes de junio previo y en el mes de diciembre.

En cuanto a la relación entre la temperatura mínima y el crecimiento medio radial para SR100, encontramos un efecto positivo en el mes de junio anterior al período de crecimiento, además confirmamos las tendencias negativa y positiva para el julio previo y la dupla abril-junio, respectivamente, que mostraban las medias y las máximas. En el rodal SR200 aparece una clara influencia positiva de las temperaturas mínimas sobre el desarrollo del árbol, son significativos los meses de diciembre y junio.

La figura 19 muestra las cronologías resultantes tras el proceso de estandarización por el método 'smoothing spline' descrito en el capítulo anterior. Las cronologías estándar se elaboran a partir del índice de ancho de anillos y están acompañadas por una curva de suavizado de un tercio de la longitud de la serie. Puede observarse que es más larga la cronología obtenida para el conjunto de SR200 que para SR100. En cambio, en éste último el número de muestras es más constante.

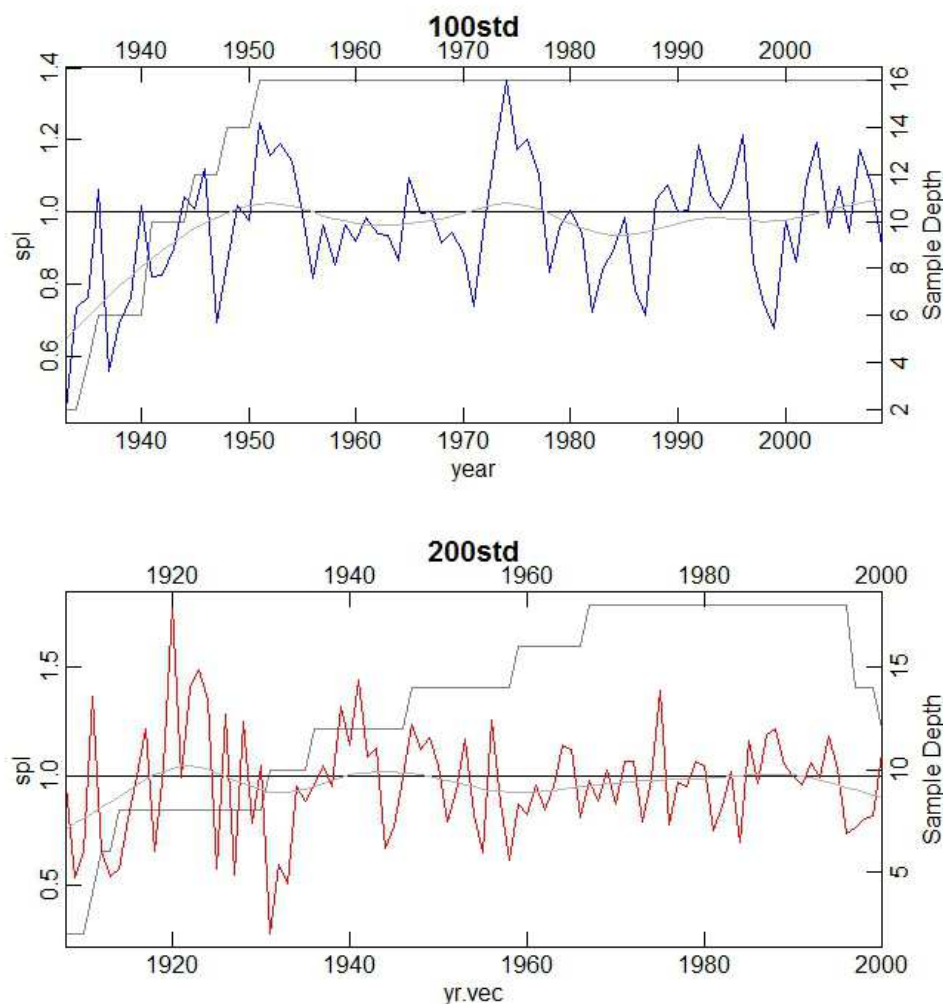


Figura 19. Cronologías residuales (estandarizadas) para los rodales SR100 (azul) y SR200 (rojo) de *Prosopis caldenia*. Incluye un suavizado por defecto de 1/3 la longitud de la serie. En el eje secundario está representado el número de muestras (camino) disponibles.

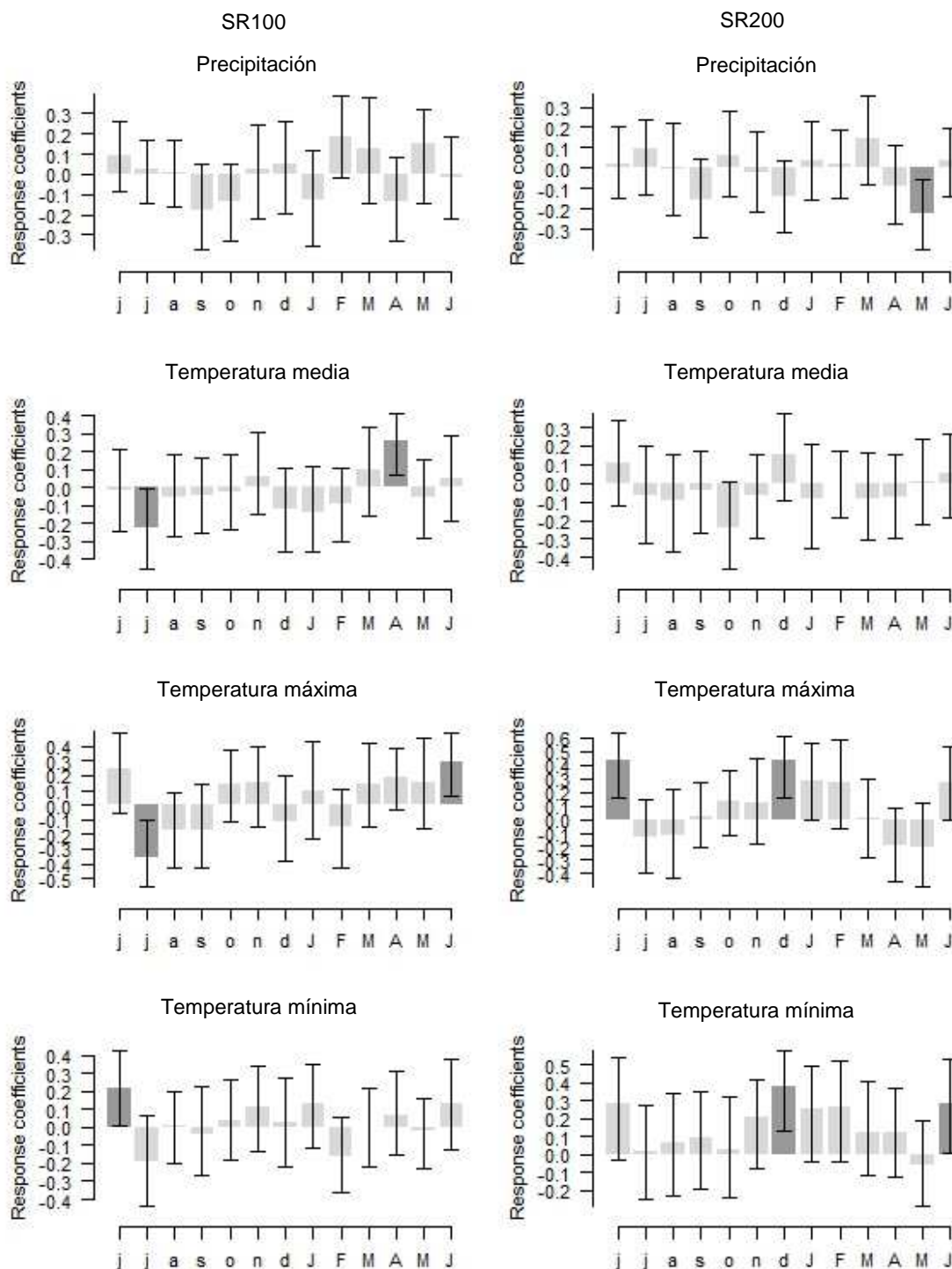


Figura 20. Respuesta climática entre variables de precipitación y temperatura (media, máximas, mínimas) y la señal residual dendrocronológica para los rodales SR100 y SR200. Valores de coeficiente respuesta (banda gris) y significancia $p < 0,05$ (banda gris oscuro). Los intervalos de confianza corresponden a las barras. El período de crecimiento se considera desde septiembre a mayo.

5.3.2. Comparativa árboles individuales de SR100

La respuesta individual de los árboles de SR100 frente a la precipitación (Figura 21) se presenta más diversa que la respuesta conjunta. En aquella el resultado no alcanzaba valores de significancia relevantes pero ahora vemos que un 50% de los individuos sí tienen respuestas significativas. Estos individuos son el SR101, SR102, SR104 y SR107. Entre las respuestas significativas aparecen afectando negativamente: junio previo, octubre, noviembre, diciembre y abril. Para la señal positiva encontramos septiembre y febrero. La única señal que se repite en dos ejemplares distintos es la de abril.

Si bien es cierto que no todos los árboles repiten el mismo patrón y que en muchos casos no se alcanzan valores significativos, al observar los gráficos de forma general se puede entrever una cierta tendencia de la precipitación a afectar de forma negativa al crecimiento. Por un lado de los 9 coeficientes significativos, 7 son negativos; por otro, en los meses de septiembre, enero y abril más de un 50% de los árboles presentan también valores negativos.

Frente a la temperatura media (Figura 22) encontramos tres ejemplares de este rodal sin competencia cuyos coeficientes de respuesta alcanzan valores significativos: SR102, SR106 y SR107. Dichos coeficientes son negativos en los meses de julio previo, agosto previo, diciembre y febrero. Se muestran, por el contrario, positivos en junio previo y julio.

Ninguna de estas respuestas significativas se repite en más de un árbol, pero se pueden apreciar señales comunes representativas para el conjunto de los individuos: el mes de julio previo al desarrollo del árbol tiene una tendencia negativa en más del 50% de los árboles; lo mismo ocurre en septiembre tras la parada vegetativa, el árbol no tolera temperaturas muy altas. Una última consideración se puede hacer para la estación otoñal, donde al menos 5 pies reflejan tendencias positivas en más de dos meses de los tres que integran esta estación, por lo que podríamos afirmar que agradecen las temperaturas cálidas durante el otoño.

La señal climática de las temperaturas máximas a nivel individual (Figura 23) es superior a la señal conjunta para el rodal SR100. En este caso son 7 los árboles que ofrecen respuestas significativas: SR101, SR102, SR103, SR104, SR106, SR107, SR108. Éstas se dan en; junio previo, julio previo, agosto previo, septiembre, octubre, noviembre, diciembre, febrero, abril y junio. Se repite la señal negativa de julio previo en dos ejemplares y la positiva de junio hasta en tres ocasiones.

Atendiendo a las tendencias comunes que se pueden extraer de estos análisis individuales, a pesar de no ser significativas, encontramos que las temperaturas máximas de los meses de junio (previo y posterior) tienen efectos positivos sobre el crecimiento en más de un 50% de los pies, que en los dos últimos meses del invierno previo (julio y agosto) y en el mes de febrero existe por el contrario un efecto negativo en más de la mitad de los árboles y que, como ocurría con las temperaturas medias, el otoño es más favorable para el desarrollo del árbol con temperaturas cálidas.

SR100. Precipitación

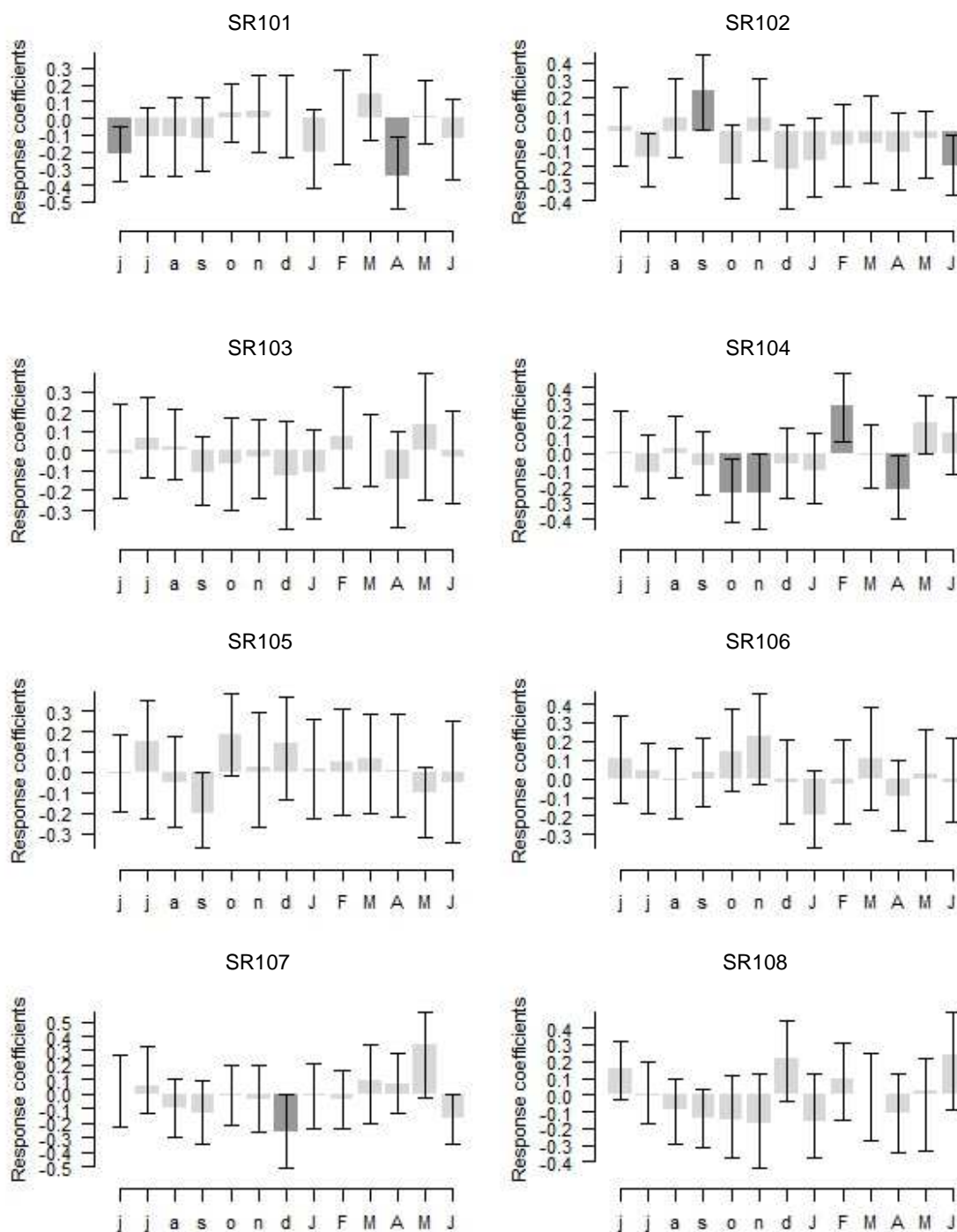


Figura 21. Respuesta climática entre variable de precipitación y la señal residual dendrocronológica para los individuos del rodal SR100. Valores de coeficiente respuesta (banda gris) y significancia $p < 0,05$ (banda gris oscuro). Los intervalos de confianza corresponden a las barras. El período de crecimiento se considera desde septiembre a mayo.

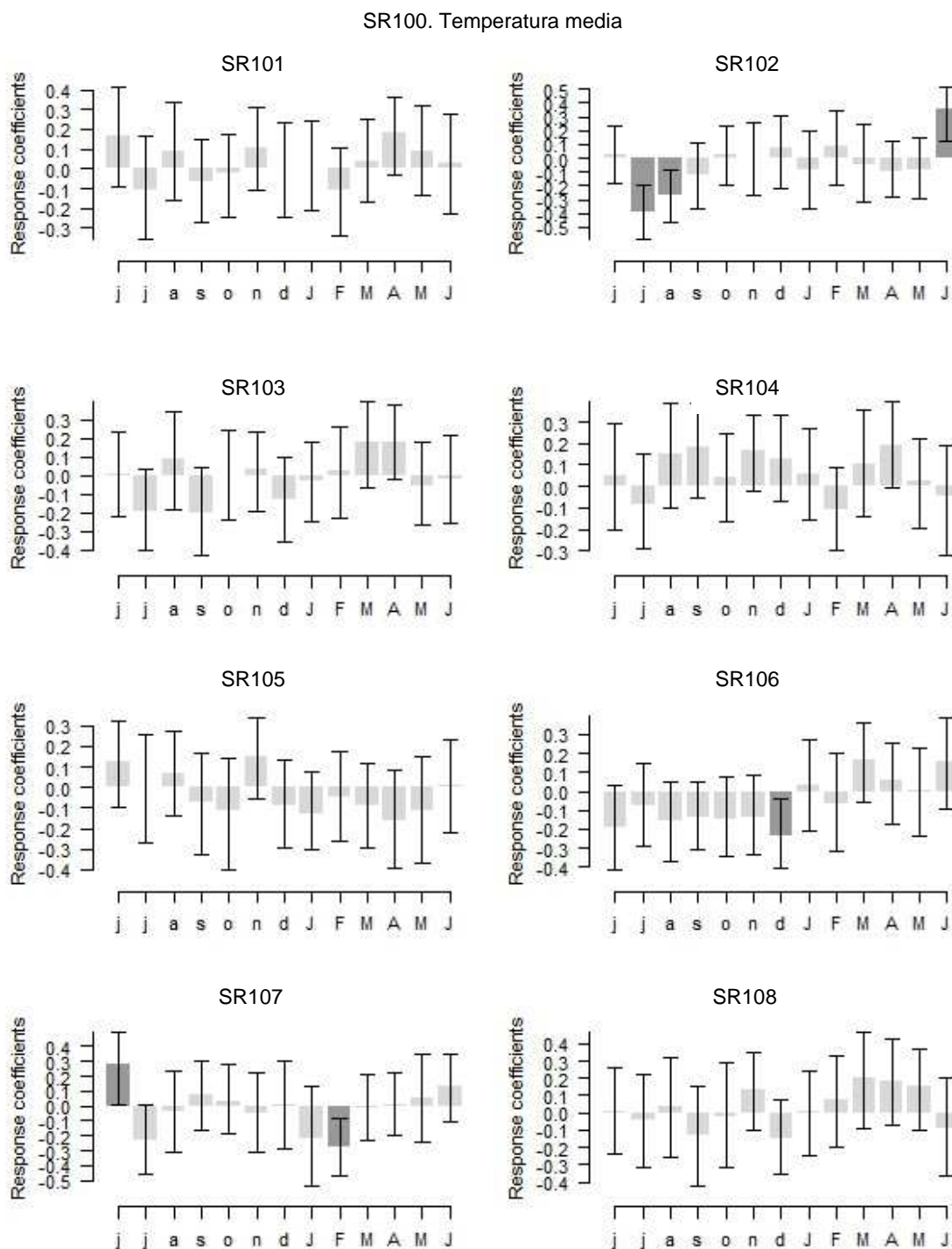


Figura 22. Respuesta climática entre variable de temperatura media y la señal residual dendrocronológica para los individuos del rodal SR100. Valores de coeficiente respuesta (banda gris) y significancia $p < 0,05$ (banda gris oscuro). Los intervalos de confianza corresponden a las barras. El período de crecimiento se considera desde septiembre a mayo.

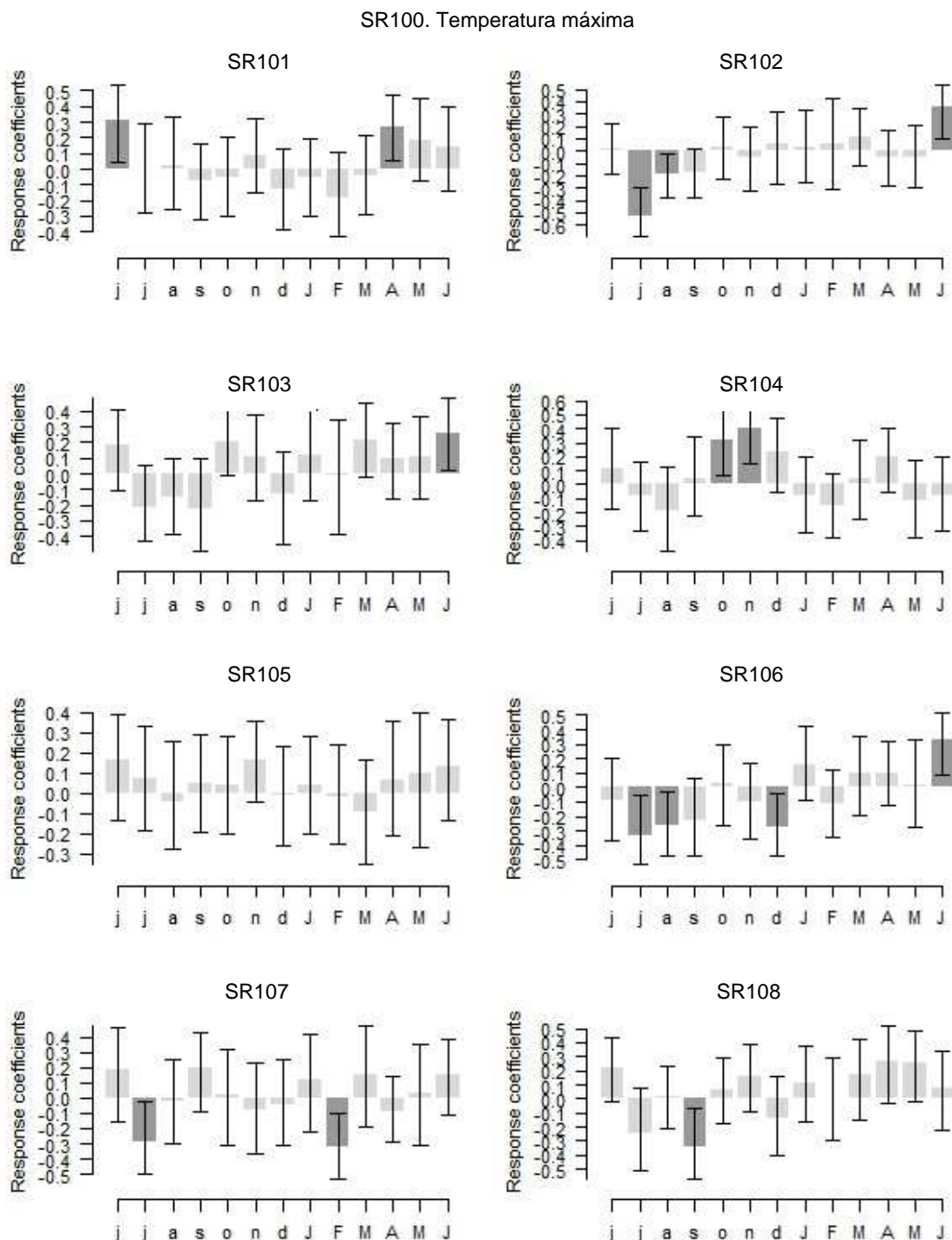


Figura 23. Respuesta climática entre variable de temperatura máxima y la señal residual dendrocronológica para los individuos del rodal SR100. Valores de coeficiente respuesta (banda gris) y significancia $p < 0,05$ (banda gris oscuro). Los intervalos de confianza corresponden a las barras. El período de crecimiento se considera desde septiembre a mayo.

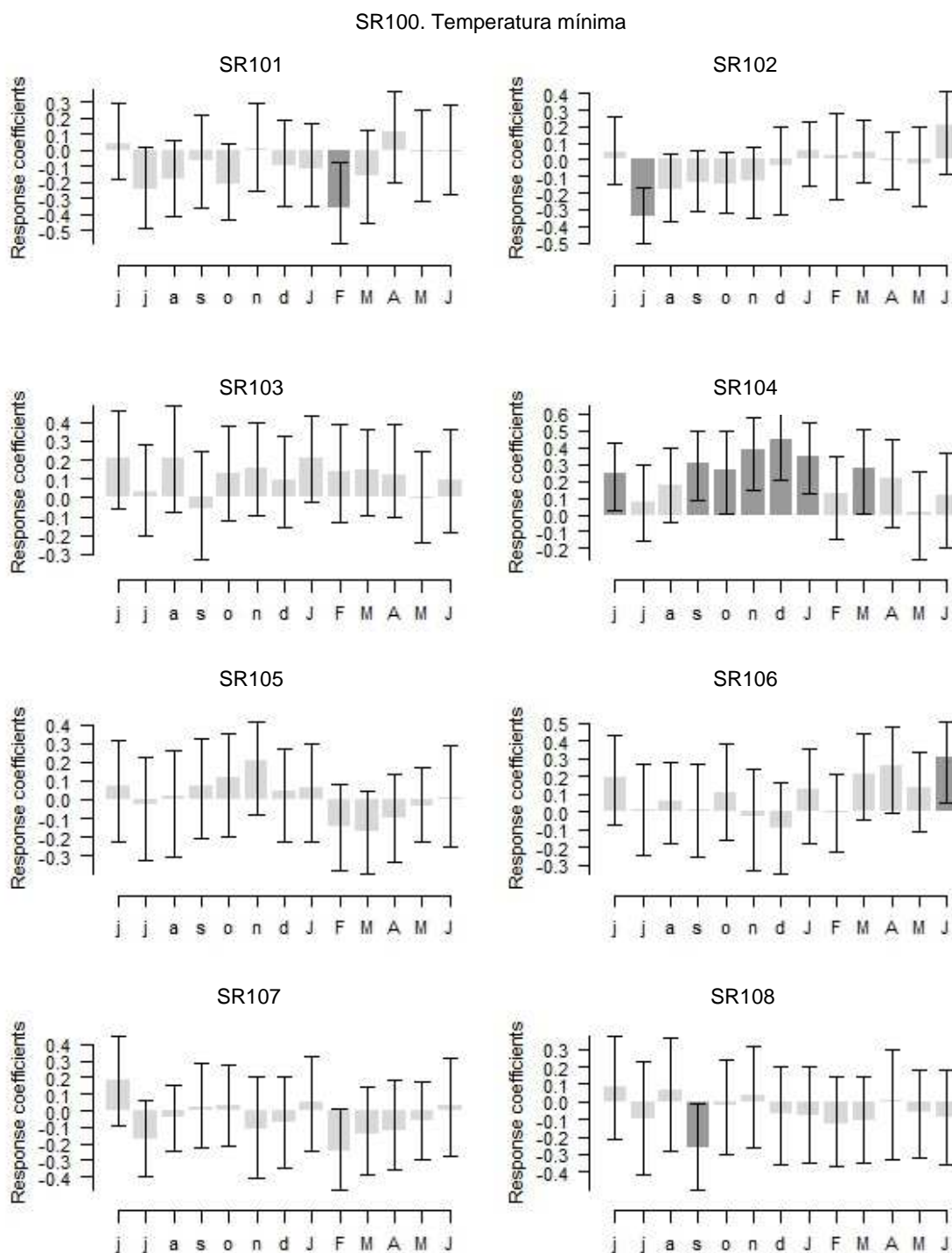


Figura 24. Respuesta climática entre variable de temperatura mínima y la señal residual dendrocronológica para los individuos del rodal SR100. Valores de coeficiente respuesta (banda gris) y significancia $p < 0,05$ (banda gris oscuro). Los intervalos de confianza corresponden a las barras. El período de crecimiento se considera desde septiembre a mayo.

La relación entre las temperaturas mínimas y los árboles que crecieron sin competencia (Figura 24) evidencia 2 grupos con distintas respuestas: por un lado los que tienen tendencias principalmente negativas (SR101, SR102, SR107 y SR108) y por otro los que tienen mayoritariamente tendencias positivas (SR103, SR104 y SR106). Con esta división es difícil encontrar patrones mensuales y/o estacionales comunes pero se puede destacar que prácticamente todos son favorables a las temperaturas mínimas elevadas en los meses de junio (previo y posterior), algo que ya se observó con las máximas.

De nuevo se vuelve a comprobar que los resultados individuales son más heterogéneos que la media conjunta. En este caso de los meses que resultan significativos (junio previo, julio previo, septiembre, octubre, noviembre, diciembre, enero, febrero, marzo y junio) no hay ninguno que se repita más de una vez, es más resulta curioso que la temperatura mínima tiene una significancia positiva para SR104 y, en cambio, se presenta negativa para SR108.

5.3.3. Comparativa árboles individuales de SR200

En el análisis general del rodal SR200 frente a la precipitación sólo aparece con una respuesta significativa el mes de mayo, siendo esta negativa. En el análisis individual (Figura 25) este mes adquiere significancia en SR209 y SR210, y además entre los ejemplares SR202, SR203, SR204 y SR205 aparecen los meses de octubre, noviembre, diciembre, enero y marzo. El mes de diciembre tiene una respuesta significativa en tres de ellos y el mes de enero en otros dos. Del total de los 10 coeficientes significativos, 8 son negativos.

El mes de marzo, que no tiene significancia en el análisis conjunto, guarda una tendencia positiva en más del 50% de los árboles; el mes de mayo, el cual sí tiene significancia en el conjunto, conserva la tendencia negativa también en más de la mitad de los árboles. Respecto a las precipitaciones durante la estación estival, más de 6 ejemplares acusan efectos negativos durante al menos 2 meses de dicho período.

Los pies analizados del rodal SR200 no muestran una respuesta reseñable frente a la temperatura media (Figura 26). En todo caso hay 4 individuos que presentan en algún mes valores significativos, es el caso de la respuesta positiva de diciembre para SR202 y SR207 y la respuesta negativa de octubre en SR209 y SR210.

No aparece ninguna tendencia significativa estacional pero sí hay meses en los que la temperatura parece afectar de forma similar a todos los árboles. Más del 50% de los ejemplares siguen una tendencia positiva en los meses de junio previo y diciembre; y negativa en el mes de octubre.

La temperatura máxima parece tener más efecto que la media sobre el crecimiento de los árboles de SR200 (Figura 27). De los nueve árboles de este rodal, ocho tienen al menos un mes con respuesta significativa a la temperatura máxima, es decir, todos excepto SR208. Éstas son positivas en julio previo por dos veces, diciembre en tres árboles, enero y febrero; son negativas en marzo, abril, mayo por dos veces y junio.

Las máximas de junio, diciembre, enero y febrero revelan tendencias positivas en más de la mitad de los árboles. En cuanto a las tendencias estacionales parece lógico que, siguiendo las tendencias mensuales, las altas temperaturas veraniegas tengan una relación positiva en 7 ejemplares durante al menos 2 de los meses de la estación; también vemos que durante el otoño hay 5 ejemplares con valores negativos a las altas temperaturas durante al menos 2 meses.

El análisis de la influencia de las temperaturas mínimas sobre el desarrollo del árbol tiene un elevado número de coeficientes de respuesta significativos (Figura 28) en contraste con lo que se observó en el estudio conjunto de este rodal, donde apenas señalaba dos meses con respuestas significativas. Como ya ocurriera con las temperaturas mínimas en el rodal SR100, los caldenes de SR200 también pueden agruparse según dos tendencias claramente diferenciadas: la de los individuos con respuesta positiva (SR203, SR204, SR206, SR209 y SR210) y la de los individuos con respuesta negativa (SR202, SR205, SR207, SR208).

En todos los ejemplares del primer grupo hay al menos dos meses que alcanzan valores significativos, llegando incluso a tener hasta 8 meses como es el caso de SR203. Se puede afirmar que el crecimiento de todos estos árboles mejora cuando las temperaturas mínimas son altas, es decir, cuando no hace mucho frío. Por el contrario, aunque la significancia es menor en el segundo grupo, se puede vislumbrar que los árboles crecen menos cuanto más altas son las temperaturas mínimas.

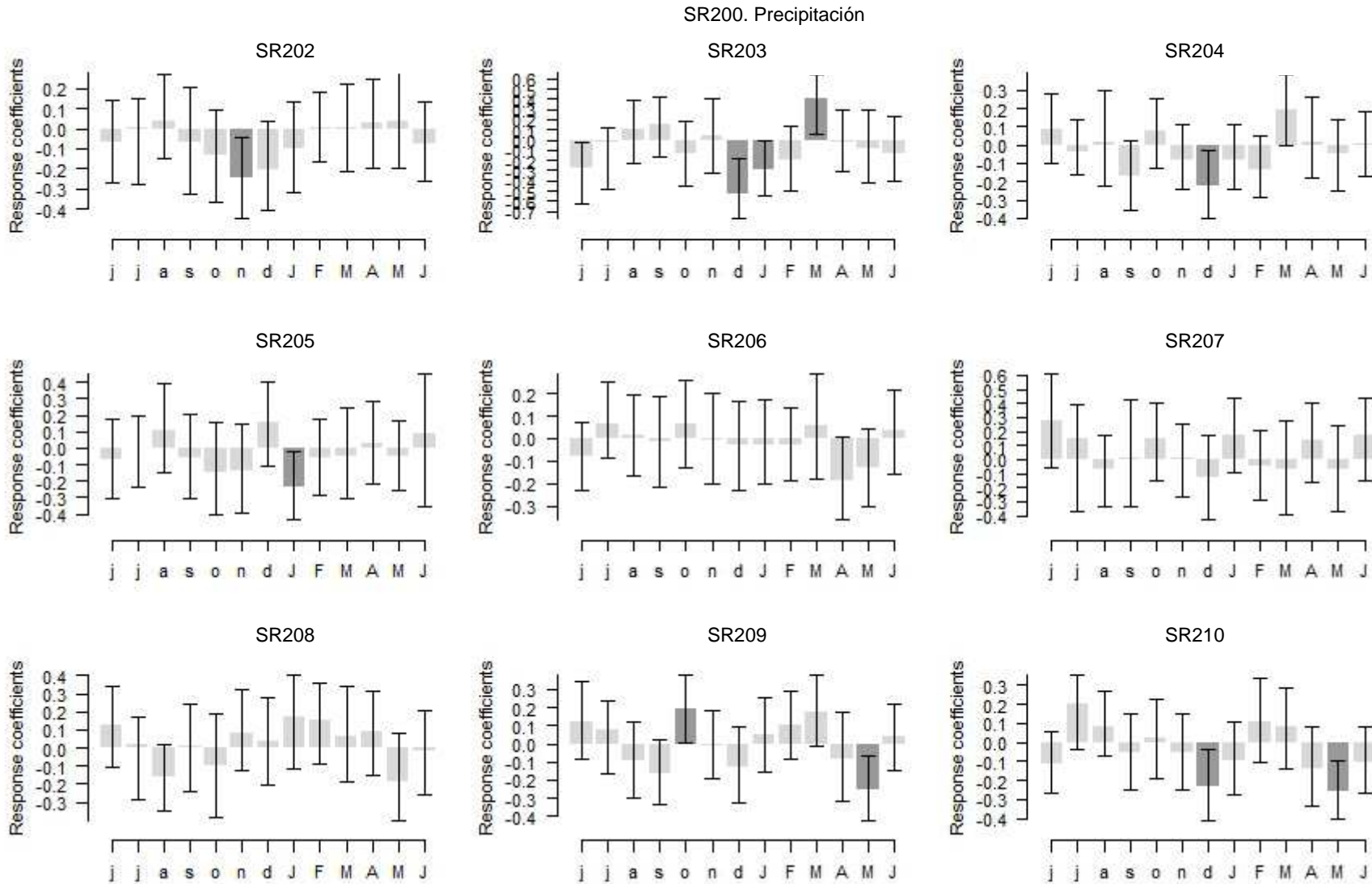


Figura 25. Respuesta climática entre variable de precipitación y la señal residual dendrocronológica para los individuos del rodal SR200. Valores de coeficiente respuesta (banda gris) y significancia $p < 0,05$ (banda gris oscuro). Los intervalos de confianza corresponden a las barras. El período de crecimiento se considera desde septiembre a mayo.

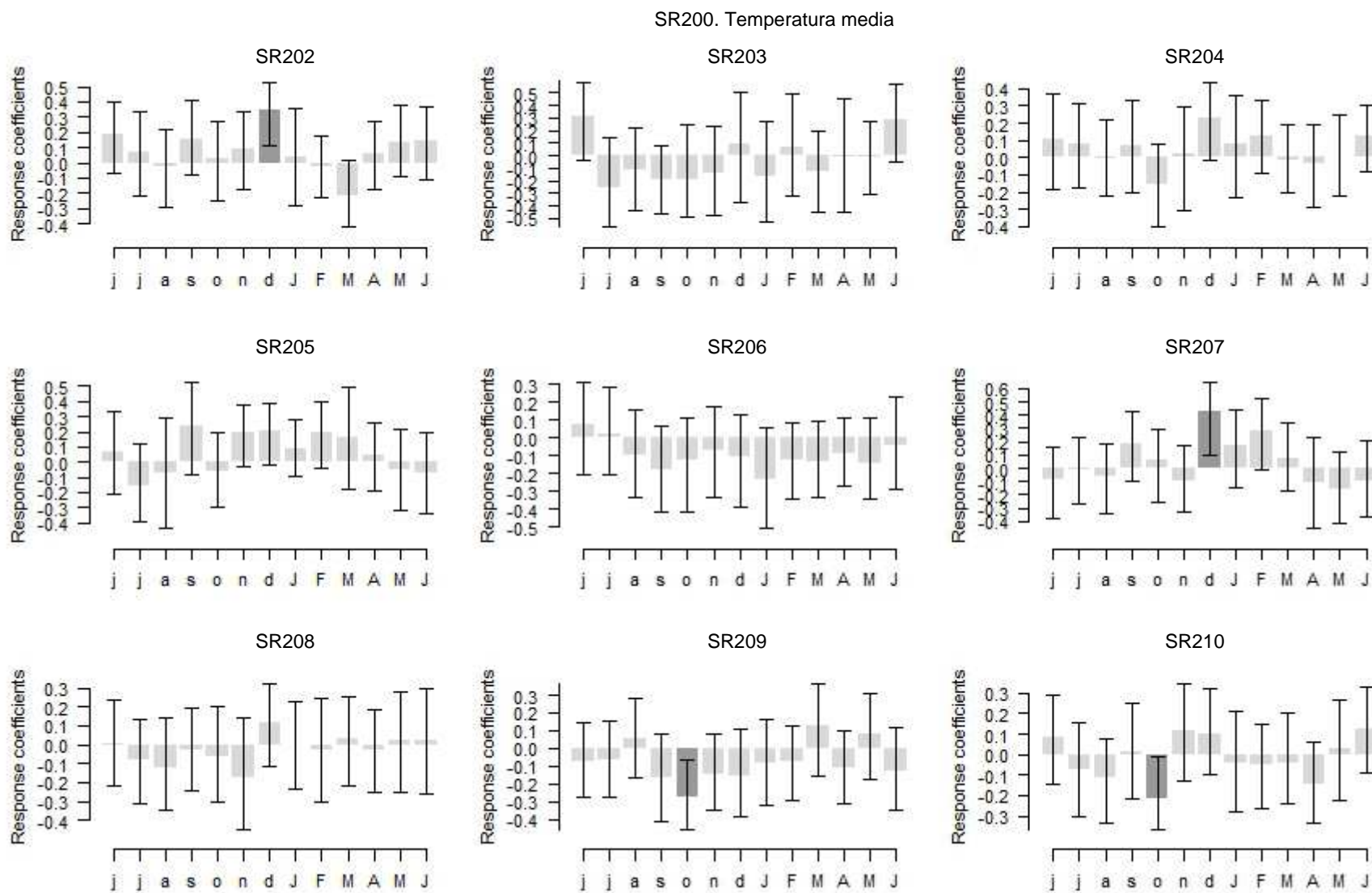


Figura 26. Respuesta climática entre variable temperatura media y la señal residual dendrocronológica para los individuos del rodal SR200. Valores de coeficiente respuesta (banda gris) y significancia $p < 0,05$ (banda gris oscuro). Los intervalos de confianza corresponden a las barras. El período de crecimiento se considera desde septiembre a mayo.

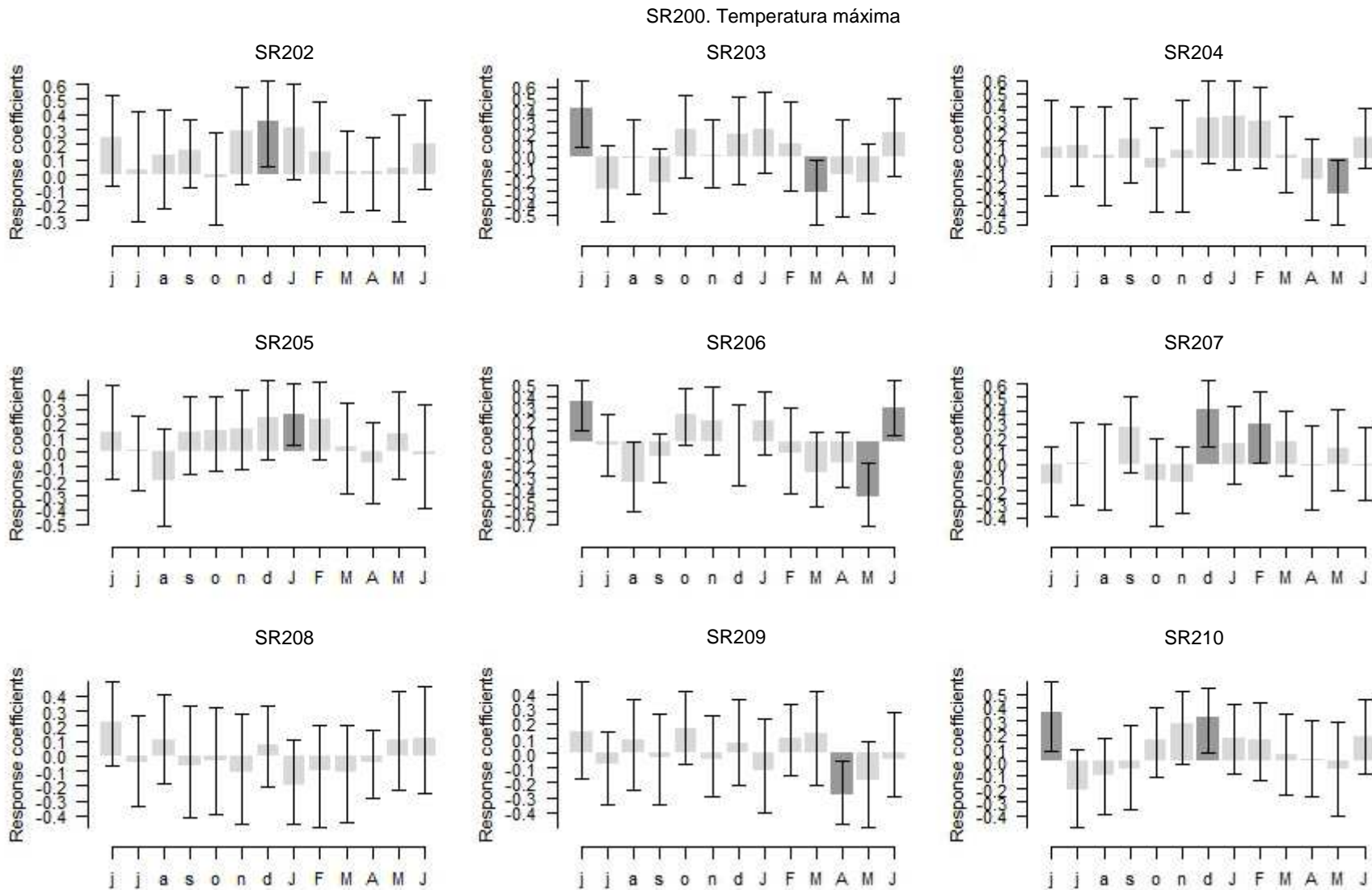


Figura 27. Respuesta climática entre variable temperatura máxima y la señal residual dendrocronológica para los individuos del rodal SR200. Valores de coeficiente respuesta (banda gris) y significancia $p < 0,05$ (banda gris oscuro). Los intervalos de confianza corresponden a las barras. El período de crecimiento se considera desde septiembre a mayo.

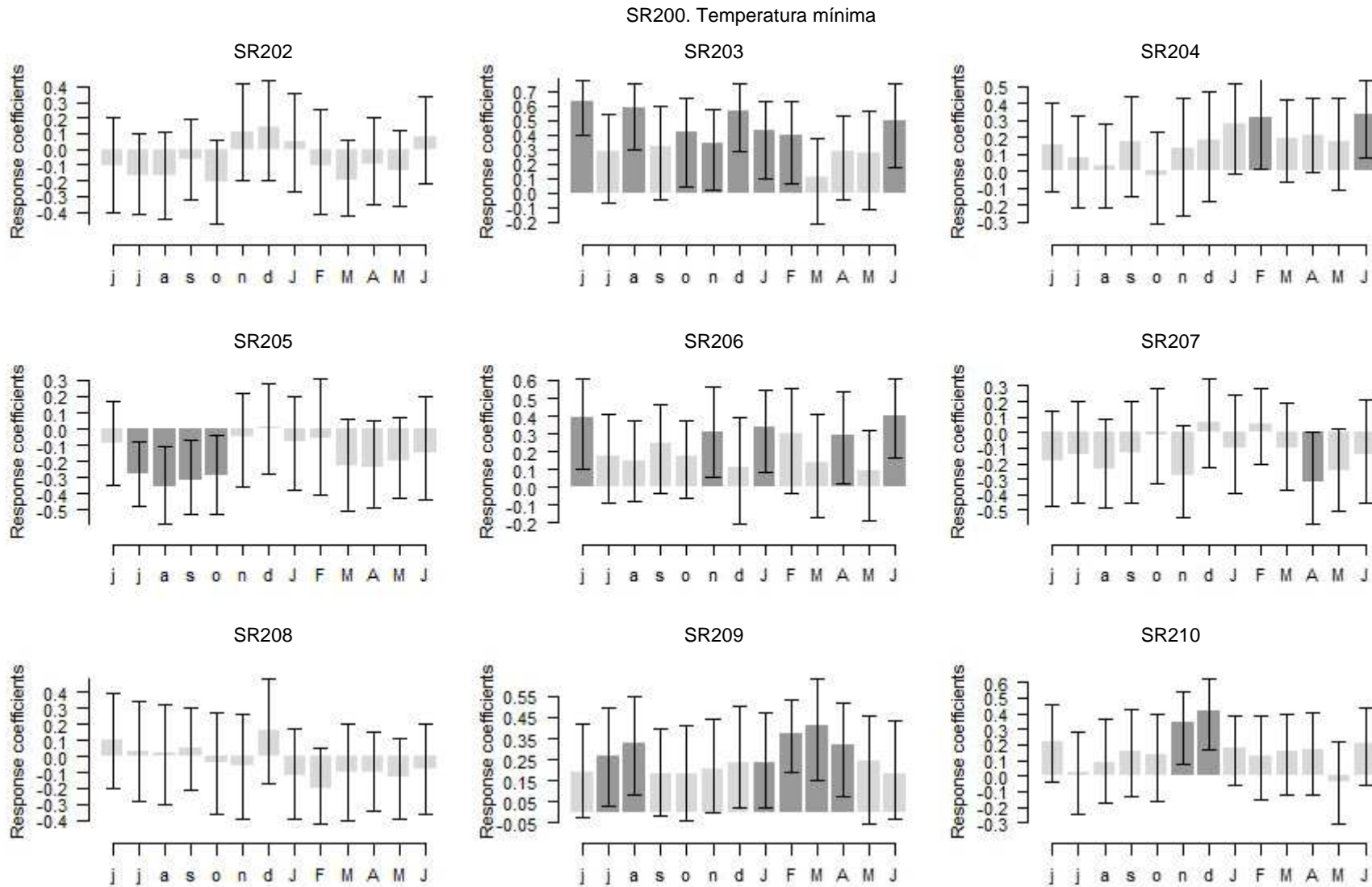


Figura 28. Respuesta climática entre variable temperatura mínima y la señal residual dendrocronológica para los individuos del rodal SR200. Valores de coeficiente respuesta (banda gris) y significancia $p < 0,05$ (banda gris oscuro). Los intervalos de confianza corresponden a las barras. El período de crecimiento se considera desde septiembre a mayo.

6. DISCUSIÓN

6. Discusión

Los resultados de este trabajo permiten reconfirmar el potencial dendrocronológico y dendroclimatológico de *Prosopis caldenia* como fuente para reconstruir los eventos ambientales presentes y pasados en el extremo norte de su distribución mundial.

6.1. Cofechado y liberaciones

La datación revela un período de años en común superior en el rodal sin competencia a pesar de que los individuos más longevos no se encuentran en este rodal, esto se explica porque la conversión del terreno a cultivo agrícola suprime las dinámicas naturales de la masa e impide el establecimiento de nuevos individuos, por lo tanto los caldenes que quedaron en pie en ese momento son los mismos que se cortaron definitivamente en el año 2009. En cambio, en el rodal SR200, la propia dinámica forestal posibilitó la regeneración y la incorporación de nuevos pies al estrato arbóreo.

En este estudio se observó un cofechado aceptable entre individuos creciendo en un mismo rodal y se comprobó, para ambos rodales, que los individuos más jóvenes son los que tienen más dificultades para cofechar con el resto. Además se encontró que los resultados medios son dispares entre rodales. Los valores son mejores en el rodal en competencia debido a que todos los pies han estado sometidos a la misma dinámica de rodal, es decir, influenciados por las mismas condiciones de luz, temperatura, disponibilidad de nutrientes, etc. Siguiendo este razonamiento parecería lógico que los árboles más maduros, los cuales dispusieron de más espacio para desarrollarse antes de que se cerrara la masa y actuaron como dominantes de sus compañeros, tuvieran mejores coeficientes de correlación, algo que se confirma al observar los valores de la “Tabla resumen de árboles individuales” del Anejo IV. En el rodal sin competencia el cofechado no es tan preciso pero en este caso entran en juego dos factores ecológicos importantes: primero la distinta respuesta de cada caldén a una perturbación tan importante como es la de eliminar toda competencia de golpe, y segundo la posterior aptitud individual para crecer sin factores limitantes. Se considera que estos dos aspectos son razones suficientes para justificar los diferentes valores de correlación entre uno y otro rodal.

El análisis de las instalaciones y liberaciones, cruzado con los datos históricos de la región, arroja información muy valiosa para comprender la dinámica de los rodales de caldén que forman parte de este estudio. Las primeras instalaciones en el rodal SR200 coinciden con la segunda oleada de poblamiento (1900-1915) después de la destrucción de los pueblos originarios en 1880 y con la deforestación masiva para el funcionamiento de locomotoras fruto de la llegada del ferrocarril a la región (SAyDS, 2007). Las siguientes instalaciones, ya en ambos rodales, ocurren tras el colapso poblacional de 1929, el cual llevó a un abandono masivo de las tierras en un período

conocido como “penuria agrícola” (Bogino, 2013). En la segunda mitad del s. XX, llegando a la década de los 60, se reinicia el proceso de crecimiento demográfico (SAyDS, 2007) momento en el cual pueden observarse las fuertes liberaciones en el rodal SR100. Se confirma de esta manera la hipótesis que establecimos a partir de la fotografía aérea de 1962: los caldenes de este rodal crecieron con más densidad hasta mediados de siglo y fue a partir de este momento cuando empezaron a crecer sin competencia.

6.2. Crecimientos radiales

Las dinámicas de crecimiento con respecto a la edad del árbol altamente significativas descritas por las curvas de crecimiento en las Figuras 14 y 15, son semejantes, a su vez, a las de otras masas de caldén, como las expuestas por Bogino (2005) para los sitios de Las Isletas y Don Roberto en la provincia de San Luis o las representadas por Velasco (2012) en Las Vertientes (La Pampa).

La culminación del crecimiento medio radial es tan solo 3 años más tardía en SR100 que en SR200. En San Luis, Bogino (2005) determinó valores entre 29 y 59 años para alcanzar este punto y, en la Pampa, Dussart *et al.* (1997) y Peinetti *et al.* (1994) establecieron un rango entre 18 y 35 años y 15 y 38 años, respectivamente. SR100 responde mejor a los valores estipulados para la provincia de San Luis, mientras que SR200 cabría dentro de cualquiera de las clasificaciones mencionadas.

El crecimiento medio radial, como era de esperar, es significativamente mayor en el rodal sin competencia (5,12 mm) que en el rodal con competencia (3,94 mm). La no competición entre individuos por acceder a los recursos disponibles es un factor determinante en el desarrollo de los árboles de caldén (Vivalda, 2013) y de algarrobo (*Prosopis flexuosa* DC) (Catalán, 2000). Los valores obtenidos en el rodal sin competencia superan por mucho los crecimientos estimados por otros trabajos tanto en la provincia de San Luis (2,69 - 3,97 mm) (Bogino, 2005) como en la Pampa (2,2mm - 4,52mm) (Dussart *et al.*, 1997 y Peinetti *et al.*, 1994), y son incluso superiores a los registrados por especies introducidas con fines forestales, como es el caso de *Pinus elliotii* Engelm que ronda los 5,09 mm en la serranía de San Luis (Bogino *et al.*, 2003). Por el contrario, las cifras de crecimiento del rodal en competencia entran dentro de los rangos de crecimiento descritos en los trabajos citados, a escala provincial llama la atención que el crecimiento de 3,94 mm rozaría el máximo valor descrito por Bogino (2005) de 3,97 mm.

En la misma línea están los crecimientos radiales acumulados: Bogino y Villalba (2008) estiman crecimientos radiales acumulados de 269,85 mm, 248,44 mm, 223,63 mm y 208,81 mm para otros montes de la provincia de San Luis; el valor promedio para SR100 (357 mm) es superior a todos ellos y superior a SR200, y éste último tiene una cifra (267 mm) muy similar a la máxima descrita por ellos (269 mm). En su trabajo de 2005, Bogino, afirmó, sobre estudios de área basal, que el turno biológico de corta del caldén estaba entre los 66 y los 100 años, momento en el cual los ejemplares rondaban los 50 cm de diámetro; utilizando la gráfica de crecimiento acumulado (Figura 16), se puede ver que en SR100 el crecimiento acumulado medio llega a los

250 mm de radio cerca de los 50 años, edad que aumenta hasta los 80 años para SR200. Por todo lo recientemente discutido se podría afirmar que, independientemente de las características diferenciales entre los dos rodales, ambos tienen unas extraordinarias tasas de crecimiento.

La desviación estándar es mayor en el rodal con competencia debido a que el rango de edades de los individuos analizados es más amplio que en el otro rodal. En SR200 tenemos árboles jóvenes (36 - 42 años), árboles de edad media (61 - 69 años) y árboles maduros (90 - 93 años); en SR100 todos son caldenes de edad media entre 59 y 77 años.

6.3. Análisis dendroclimático

6.3.1. Comparativa a de nivel rodal

El rodal sin competencia presenta respuestas poco consistentes frente a las variables climáticas: la precipitación no reporta respuesta significativa alguna de modo general y las tres temperaturas analizadas tampoco parecen dejar una señal fuerte en el crecimiento de los árboles. En el caso de la precipitación resultados similares fueron descritos por Fisher y Krebs en 1931, cuando en un primer intento por comprobar el potencial dendroclimático del caldén llegaron a la conclusión de que no existía una correlación significativa entre el crecimiento de éste y las precipitaciones. En todo caso éste primer análisis fue testado únicamente sobre un individuo y en una posición geográfica bastante más al sur del monte que aquí se estudia.

Las temperaturas elevadas en los meses de junio previo y posterior potencian el desarrollo de estos pies, pues les permite prolongar un mes más la época de crecimiento. En el otoño las temperaturas cálidas favorecen también a estos ejemplares, como queda patente en la señal significativa del mes de abril. Durante la parada vegetativa, ya en el mes de julio, estos árboles aislados se ven perjudicados por las altas temperaturas, contradiciendo lo que, de forma general, obtuvieron Bogino (2005) y Bogino y Jobbagy (2011) para otros cercanos sitios de la provincia de San Luis. Bogino (2005) encontró una respuesta negativa generalizada, que incluía los meses de invierno, en El Liebral situado unos 185 km al sur del rodal SR100.

La respuesta del rodal con competencia tampoco es excesivamente clarificadora con respecto a la precipitación, adquiere significancia negativa el mes de mayo probablemente por tratarse de lluvias extemporales, puesto que las precipitaciones normalmente se concentran en primavera-verano. Las temperaturas parecen tener una respuesta más uniforme que en SR100: se observa una predominancia de meses con coeficientes de correlación positivos en las máximas y, sobre todo, en las mínimas. Speer (2010) ya constató que los largos períodos de crecimiento y unas buenas condiciones de humedad favorecen el desarrollo de los árboles en los climas semiáridos.

Esta mayor relación de la temperatura que de la precipitación con el crecimiento para masas de caldén fue también descrita por Bogino (2005) y Bogino y Jobbagy

(2011). Viendo que el rodal SR200, cuyos pies forman una estructura boscosa y, por consiguiente, están sometidos a las dinámicas del ecosistema forestal, se ajusta mejor a los resultados de otros trabajos en la misma provincia para masas de caldén similares, no sería aventurado afirmar, puesto que no existen estudios previos para contrastarlo, que las diferencias con SR100 se deben, precisamente, a la ausencia de competencia fruto de su condición de masa abierta.

6.3.2. Comparativa árboles individuales de SR100

La respuesta individual a la precipitación de los caldenes pertenecientes al rodal SR100 confirma porqué en la comparación general no salen coeficientes significativos. La señal es muy baja en la mayoría de los árboles y, aunque encontramos 4 individuos con valores significativos, tan sólo uno de ellos, el SR104, parece ser verdaderamente vulnerable a los valores de precipitación. Se comentó en el capítulo anterior la visible tendencia negativa de los árboles al aumentar las lluvias, esto podría estar relacionado con fenómenos de aumento de la capa freática, tal y como expusieron Bogino y Jobbagy (2011) para sitios en donde ésta estaba próxima a la superficie.

La señal de las temperaturas medias en el crecimiento radial individual tampoco es demasiado esclarecedora, el individuo SR102 es el único que revela un crecimiento susceptible a esta variable. Por el contrario la señal climática de las temperaturas máximas sobre los árboles individuales es superior a la señal conjunta, solamente SR105 carece de coeficientes significativos, y superior a la señal del resto de variables climáticas analizadas. Las tendencias no significativas detectadas con estas dos temperaturas, aunque más consistentes en las máximas, son equiparables: por un lado parece lógico que los árboles prefieran temperaturas cálidas durante el otoño y principios del invierno pues de esta manera prolongan la estación de crecimiento; no lo es tanto el hecho de que algunos ejemplares respondan de forma negativa a las temperaturas altas durante la parada vegetativa, como ya comentamos al analizar la señal conjunta.

La respuesta más interesante se encuentra, no obstante, al relacionar el crecimiento anual con las temperaturas mínimas; existen, como ya se indicó, dos grupos diferenciados: unos con tendencias mayoritariamente negativas y otros con tendencias mayoritariamente positivas. Volviendo sobre los árboles que componen este rodal se comprobó que la división entre ambos grupos está en los 70 años de edad: los árboles menores, SR102 (59 años), SR107 (62 años), SR108 (65 años) y SR101 (69 años), responden generalmente de forma negativa a las temperaturas mínimas elevadas y los árboles con más de 70 años, SR106 (74 años), SR103 (75 años) y SR104 (77 años), se ven favorecidos cuando aumenta dicha variable. Ninguna otra característica estudiada (correlación, crecimiento acumulado o crecimiento medio) se ajusta tan bien para explicar las distintas respuestas de estos ejemplares.

Aplicando una visión global a todos los análisis individuales de las variables climáticas frente a los árboles del rodal SR100 se pueden resumir varios aspectos. Con respecto a la señal de las variables climáticas, la precipitación es menos significativa que la temperatura como ya se intuía en la respuesta conjunta, y entre

ellas son más influyentes las mínimas y las máximas, siendo éstas últimas las que mayor grado de relación tienen con el crecimiento de los árboles. En cuanto a los árboles que integran el rodal, SR102 y SR104 destacan por ser los más sensibles al clima, en cambio SR103, SR105 y SR108 prácticamente no recogen la señal climática. El resto, SR101, SR106 y SR107, captan la señal en menor grado. No se aprecia ningún indicio aparente, más que la innata singularidad de todo ser vivo, que explique porqué unos son más sensibles que otros dentro del mismo rodal.

6.3.3. Comparativa árboles individual de SR200

El crecimiento individual de los caldenes en competencia muestra una respuesta tenue frente a la precipitación, siendo el ejemplar SR203 el que más susceptible parece a dicha variable. La tendencia negativa en la mayoría de los casos y el hecho de que la precipitación resulte desfavorable en la estación estival, siendo ésta la época habitual de lluvias, dan más consistencia a la hipótesis que se estableció, al hablar de los individuos de SR100, de que este efecto puede deberse al aumento de la capa freática.

La relación temperatura media versus crecimiento radial de los árboles del rodal SR200 es la que menos señal deja de todo el análisis individual. Ningún individuo se revela especialmente vulnerable y tampoco aparecen tendencias no significativas relevantes. Estos mismos árboles, a diferencia de lo que acabamos de afirmar, sí tienen relación con las temperaturas máximas, sólo SR208 no alcanza coeficientes significativos, predominando las tendencias positivas en línea con la señal conjunta y con los estudios de Bogino (2005) y Bogino y Jobbagy (2011).

Una vez más es al llegar a la temperatura mínima cuando se encuentran los resultados más interesantes, siendo además en este rodal SR200 la variable que más influencia tiene sobre el crecimiento radial. Al igual que ocurrió en el rodal SR100, aquí también aparecen dos grupos según sea positiva o negativa su respuesta. En las positivas están los árboles más longevos: SR 206 (85 años), SR210 (87 años), SR209 (90 años) y SR204 (93 años); en las negativas vuelven a estar los árboles menores de 70 años: SR207 (42 años), SR205 (54 años), SR208 (61 años), SR202 (69 años). SR203 (34 años) es la excepción que confirma la regla pues a pesar de ser el árbol más joven tiene una respuesta positiva, esta asociación se justifica al comprobar que SR203 es también el árbol con más sensibilidad a las variables climáticas de todo el grupo.

Recapitulando, para este caso, el de los árboles sometidos a competencia, la variable precipitación también se muestra menos influyente sobre el crecimiento que las temperaturas, en concreto las máximas y las mínimas. Esta última es la que arroja una mayor cantidad de respuestas significativas frente al desarrollo del árbol, en cambio la temperatura media es la variable que menos influye. El caldén SR208 no demuestra ninguna sensibilidad significativa a las variables analizadas y los individuos SR203, SR209 y, en menor grado, SR210 son los que más vulnerabilidad al clima presentan de todo el grupo. En este grupo de árboles tampoco se encuentran indicios

claros que expliquen las diversas sensibilidades al clima entre individuos del mismo rodal.

6.3.4. Relevancia del análisis individual

En función de lo aquí expuesto se puede confirmar, tal y como sugirió Carrer (2011) para coníferas europeas, que el análisis general de los árboles de los rodales SR100 y SR200 frente a las variables climáticas oculta tendencias individuales muy valiosas para conocer el comportamiento del caldén en el extremo norte de su distribución natural. De estas tendencias la más relevante en ambos rodales es la que aparece con las temperaturas mínimas y que clasifica en dos grupos opuestos a los árboles de un mismo rodal; clasificación que además parece independiente de las condiciones de desarrollo de los individuos, por tanto se presenta como la única de todas las características y variables comparadas a lo largo de este trabajo que no se ve influenciada por la densidad del rodal. Carrer (2011) consiguió, acudiendo al análisis individual, aportar mayor robustez a las tendencias generales del análisis conjunto; este estudio, en cambio, lleva a cuestionar los resultados que de forma general se han asociado a las masas de caldén y se puede enmarcar junto con otros trabajos que encontraron, para otras especies, asociaciones particulares con el clima a raíz de diferenciar los ejemplares del rodal según sus clases de edad, tal es el caso de las publicaciones de Carrer y Urbinati (2004) sobre *Larix decidua* Mill. y *Pinus cembra* L., Rozas *et al.* (2009) sobre *Juniperus thurifera* L., Vieira *et al.* (2009) sobre *Pinus pinaster* Ait. y Hadad (2013) sobre *Araucaria araucana* (Molina) K. Koch. Todos ellos comprobaron que la sensibilidad climática de los anillos de crecimiento varía con la edad, unos afirman que ésta aumenta en las clases de edad maduras (Carrer y Urbinati, 2004) y otros justo lo contrario, es decir, que la sensibilidad disminuye con la edad (Rozas *et al.*, 2009; Vieira *et al.*, 2009; Hadad, 2013); pero ninguno determina que dicha sensibilidad pueda sufrir cambios bruscos en la tendencia, como se ha encontrado en estos caldenes de la provincia de San Luis.

Bogino (2005) señalaba, que quizás lo más importante del estudio de Fisher y Krebs en 1931 era la intención de éstos de “*provocar un cierto interés por las investigaciones de esta índole*”. Ha pasado casi un siglo desde aquel primer intento y, efectivamente, el interés por los trabajos dendrocronológicos sobre caldén ha ido *in crescendo* como ha quedado demostrado con la cantidad de bibliografía relacionada citada a lo largo de esta discusión. Si a esto se le suma el aporte de Carrer (2011) sobre la necesidad de individualizar el estudio clima-árbol, se obtiene como resultado este trabajo que, entre otras cosas, ofrece una nueva perspectiva para llegar a comprender la compleja relación entre el crecimiento del caldén y el clima.

7. CONCLUSIONES

7. Conclusiones

Este estudio, cumpliendo con los objetivos generales y específicos que se plantearon al comienzo, analiza las dinámicas de crecimiento y las respuestas individuales y conjuntas frente a las variables climáticas de dos rodales de *Prosopis Caldenia* en la provincia de San Luis (Argentina). Se exponen a continuación las conclusiones más importantes extraídas del conjunto de los análisis realizados:

1. Se reconfirma el potencial dendrocronológico de *P. caldenia* en el extremo norte de su distribución mundial.
2. El cofechado en la zona de estudio es aceptable entre los ejemplares de un mismo rodal y superior cuando los árboles se encuentran influenciados por la dinámica del rodal.
3. El análisis de liberaciones e instalaciones confirma las diferentes condiciones de crecimiento en cuanto a la densidad del rodal SR100 a partir de la mitad del siglo XX.
4. Las dinámicas de crecimiento son significativamente similares en ambos rodales y comparables con las de otros montes de caldén en estaciones próximas.
5. El máximo potencial de crecimiento de la especie en la zona de estudio se encuentra en los caldenes creciendo sin competencia, los cuales muestran unos valores de crecimiento medio y acumulado significativamente superiores a los del rodal en competencia y superiores a los de otros montes de la misma especie.
6. Existen diferencias significativas en la respuesta climática conjunta de los rodales, siendo la baja densidad del rodal SR100 un factor determinante en dicha respuesta.
7. El análisis individualizado de la relación clima-crecimiento permite extraer mayor información que el análisis general tanto en el rodal con competencia como en el rodal sin competencia.
8. Aparecen respuestas climáticas diferentes entre individuos de un mismo rodal que sólo pueden ser atribuidas a la propia dinámica natural de cada uno de los árboles.
9. La respuesta individual al clima mejora al enfrentar el crecimiento radial de los árboles a las temperaturas máximas y mínimas.
10. Las temperaturas mínimas revelan la existencia de cambios de tendencia en el crecimiento, en torno a los 70 años, relacionados con la edad del árbol e independientes de la densidad del rodal.

Por último, y a modo de cierre de este trabajo, conviene enfatizar la importancia del hallazgo de respuestas climáticas opuestas entre caldenes jóvenes y adultos a partir de los análisis individuales. Este resultado abre, sin lugar a dudas, nuevas líneas de investigación dentro de la dendroclimatología que deben ser tenidas en cuenta a la hora de realizar nuevos estudios en este ámbito, a fin de poder confirmar lo que en estas páginas se expone y de esta manera conocer más a fondo la relación entre la fisiología de *P. caldenia* y las variables ambientales en los bosques de la región semiárida de Argentina.

8. BIBLIOGRAFÍA

8. Bibliografía

- BARBOSA, O., 2005. Descripción del ecosistema. En: Barbosa O.A. y Privitello, M.J.L.(Eds.), Caracterización Ecológica y utilización del caldenal de San Luis (Argentina). FICES, Universidad Nacional de San Luis, San Luis, Argentina.
- BOGINO, S., GÓMEZ, M., ÁVILA, A., FURLÁN, Z., ESCUDERO, S., CORRAL, A., LUNA, R., MARTÍN GARCÍA, J., 2003. Crecimiento de *Pinus elliottii* Engelm, en el área serrana de la provincia de San Luis.10º Jornadas Técnico Forestales. Eldorado, Misiones, Argentina.
- BOGINO, S., 2005. Crecimiento radial, turno biológico de corta y potencial dendroclimático del caldén (*Prosopis caldenia* Burkart), en la provincia de San Luis, Argentina. Tesis de Magíster en Ciencias Agropecuarias. Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina.
- BOGINO, S., 2006. El bosque de caldén en la provincia de San Luis: Situación actual y estrategias alternativas de manejo. KAIRÓS, Revista de Temas Sociales Proyecto "Culturas Juveniles Urbanas" Universidad Nacional de San Luis Año 10 – Nº 17 (Febrero / 2006) www.revistakairos.org.
- BOGINO, S., VILLALBA, R., 2008. Radial growth and biological rotation age of *Prosopis caldenia* Burkart in Central Argentina. J. Arid Environ., 72: 16-23.
- 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 and Management, 262: 1766-1774.
- BOYERO, M., 1985. "*Prosopis caldenia* Burk, en Argentina". Segundo Encuentro Regional CIID América Latina y el Caribe. Forestación en zonas áridas y Semiáridas: 270–323.
- BUNN, A.G., 2008. A Dendrochronology program library in R (dplR). Dendrochronologia, 26 (2008): 115-224.
- BUNN, A.G., KORPELA, M., BIONDI, F., CAMPELO, F., MÉRIAN, P., QEADAN, F., ZANG, C., 2012. dplR: Dendrochronology Program Library in R. R Package Version 1.5.4. URL <<http://CRAN.R-project.org/package=dplR>>.
- BURKART, A., 1939. El nombre científico del caldén en La Pampa. Darwiniana, 3: 11-115.

- BURKART, A., 1967. Leguminosas. Flora de la Provincia de Buenos Aires. IBTA Buenos Aires: 394-467.
- CANO E., 1980. Inventario Integrado de los Recursos Naturales de la Provincia de La Pampa. Clima, Geomorfología, Suelo y Vegetación. Universidad Nacional de La Pampa, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Buenos Aires, Argentina.
- CARRER, M. 2011. Individualistic and Time-Varying Tree-Ring Growth to Climate Sensitivity. PLoS ONE 6(7): e22813. doi:10.1371/journal.pone.0022813.
- CARRER, M., URBINATI, C., 2004. Age-dependent tree-ring growth responses to climate in *Larix decidua* and *Pinus cembra*. Ecology, 85: 730-740.
- CATALÁN, L., 2000. Crecimiento leñoso de *Prosopis flexuosa* DC en una sucesión post-agrícola en el chaco árido: efectos y relaciones de distintos factores de proximidad. Tesis Doctoral. Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina.
- COOK, E., 1985. A time series analysis approach to tree-ring standardization. (PhD Thesis). University of Arizona, Tucson, USA.
- DE FINA A., RAVELO A., 1975. Climatología y Fenología Agrícolas. EUDEBA: 59-80
- DUSSART, E., PEINETTI, R., BONINSEGNA, J., 1997. Análisis del crecimiento de *Prosopis caldenia* (L) Burk., en relación con parámetros ambientales y fuego. Actas de la XVIII Reunión Argentina de Ecología. Buenos Aires, Argentina.
- FRITTS, C., 1976. Tree rings and climate. Academic Press, London, United Kingdom.
- GÓMEZ HERMIDA, V., DEMARÍA, M., MACEIRA, N., 2002. Estado de conservación del bosque de caldén en la provincia de San Luis. Evaluación preliminar basada en el empleo de imágenes satelitales. Primera reunión nacional para la conservación del caldén en Argentina.
- GRISSINO-MAYER, .D., 2001. Evaluating crossdating accuracy: A manual and tutorial for the computer program COFECHA. Tree-Ring Research, 57(2): 205-221.
- HADAD, M., 2013. Análisis florístico-dendrocronológico de los bosques xéricos de *Araucaria araucana* en el contacto con la estepa patagónica en Neuquén, Argentina. Tesis de Doctorado en Ciencias Biológicas. Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina.
- HOLMES, R., 2001. Dendrochronology Program Library. Available from the Laboratory of Tree-Ring Research, University of Arizona, Tucson, USA.
- KREBS C., FISHER C., 1931. El pluviómetro secular. Circ. Sec. Prop. & Inf. Ministr. Agr. Buenos Aires. 847: 1-24.

- MAGyPN., Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación, 2012. Superficie de Soja en la República Argentina. Dirección Nacional de Tierras y Unidades Agropecuarias. Campaña 2011-2012.
- MEDINA, A., DUSSART, E., ESTERICH, D., MORICI, E., 2000. Reconstrucción de la historia del fuego en un bosque de *Prosopis caldenia* (Burk.) de Arizona, sur de la provincia de San Luis. *Multequina*, 9: 91-98.
- MEDINA, A., 2007. Reconstrucción de los regímenes de fuego en un bosque de *Prosopis caldenia*, Provincia de la Pampa, Argentina. *Bosque*, 28: 234-240.
- MEDINA, A., 2008. Cicatrices de fuego en el leño de *Prosopis caldenia* en Luán Toro, provincia de La Pampa, Argentina. *Bosque*, 29(2): 115-119.
- MONTERO, G., SERRADA, R., 2013. La situación de los bosques y el sector forestal en España - ISFE 2013. Edit. Sociedad Española de Ciencias Forestales. Lourizán, Pontevedra, España.
- MORALES, M., VILLALBA, R., GRAU, H., VILLAGRA, P., BONINSEGNA, J., RIPALTA, A., PAOLINI, L., 2001. Potencialidad de *Prosopis ferox* Grise (Leguminosae, subfamilia: Mimosoideae) para estudios dendrocronológicos en desiertos subtropicales de alta montaña. *Revista chilena de historia natural*, 74: 865-872.
- NOWACKI, G., ABRAMS, M., 1997. Radial-growth averaging criteria for reconstructing disturbance histories from presettlement origin oaks. *Ecological Monographs* 67, 225-49.
- PEINETTI, R., DUSSART, E., BONINSEGNA, J., 1994. Análisis dendroecológico preliminar de la tendencia de edad en caldén (*Prosopis caldenia* Burk.). Inc. Proc. International Meeting of the IAWA. Mar del Plata, Buenos Aires, Argentina.
- PEÑA ZUBIATE C., ANDERSON, D., DEMMI, M., SAENZ, J., D'HIRIART, A., 1998. Carta de suelos y vegetación de la provincia de San Luis. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentación, INTA y Gobierno de la provincia de San Luis.
- PERLIN, J., 1999. Historia de los bosques. El significado de la madera en el desarrollo de la civilización. (GAIA Proyecto 2050, Ed.). Madrid, España.
- R CORE TEAM., 2013. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <<http://www.R-project.org/>>.
- RISIO, L., 2012. Cuantificación de biomasa y carbon en bosques nativos de *Prosopis caldenia* (Burkart) en la Pampa semiárida, Argentina. Trabajo Final de Máster. Universidad de Valladolid, Palencia, España.

- ROZAS, V., DESOTO, L., OLANO, J., 2009. Sex-specific, age-dependent sensitivity of tree-ring growth to climate in the dioecious tree *Juniperus Thurifera*. *New Phytologist*, 182: 687-697.
- SAYDS., 2002. Primer Inventario Nacional de Bosques Nativos. Proyecto Bosques Nativos y Áreas Protegidas. Préstamo BIRF 4085 – AR. Cartografía y Superficie de Bosque Nativo de Argentina.
- SAYDS., 2005. Primer Inventario Nacional de Bosques Nativos. Proyecto Bosques Nativos y Áreas Protegidas. Préstamo BIRF 4085 – AR. Informe Nacional.
- SAYDS., 2006. Estado de Conservación del Distrito Caldén. Primer Inventario Nacional de Bosques Nativos. Inventario de campo de la Región del Espinal, Distrito de Caldén y Ñandubay.
- SCHULMAN E., 1956. Dendroclimatic change in semiarid America. University of Arizona Press. Tucson, USA.
- SPEER, J., 2010. Fundamentals of Tree-Ring Research. University of Arizona Press. Tucson, USA.
- STOKES M. A., SMILEY T. L., 1968. An Introduction to Tree-ring Dating. University of Chicago Press. Chicago, USA and London, UK.
- ZANG, C., 2012. bootRes: Bootstrapped Response and Correlation Functions for Use in Dendroclimatology. R Package Version 1.2.3. URL <<http://CRAN.R-project.org/package=bootRes>>.
- ZANG, C., BIONDI, F., 2012. Dendroclimatic calibration in R: The bootRes package for response and correlation function analysis.
- VELASCO, T., 2012. El fuego y la dinámica de los bosques de *Prosopis caldenia* en la provincia de La Pampa, Argentina: una aportación a través de los anillos de crecimiento. Trabajo Final de Carrera. Universidad Nacional de San Luis, Villa Mercedes, Argentina.
- VIVALDA, F., 2013. Impacto del fuego en la fisonomía de los rodales de *Prosopis caldenia* en la provincia de La Pampa. Trabajo Final de Carrera. Universidad Nacional de La Pampa, Santa Rosa, Argentina.
- VIEIRA, J., CAMPELO, F., NABAIS, C., 2009. Age-dependent responses of tree-ring growth and intra-annual density fluctuations of *Pinus Pinaster* to mediterranean climate. *Trees. Structure and Function*, 23: 257-265.
- VILLALBA, R., 1985. Xylem structure and cambial activity in *Prosopis flexuosa* DC. *IAWA Bulletin*. n.s., 6: 119-130.

- VILLALBA, R., BONINSEGNA, J., 1989. Dendrochronological studies on *Prosopis flexuosa* DC. IAWA Bulletin, 10(2): 155-160
- VILLAGRA, P., VILLALBA, R., 2002. Estructura poblacional del algarrobal de la reserva de Ñancuñán. La reserva de biosfera de Ñancuñán: 72-75.
- VILLAGRA, P., VILLALBA, R., BONINSEGNA, J., 2005. Structure and growth rate of *Prosopis flexuosa* woodlands in two contrasting environments of the central Monte desert. Journal of Arid Environment, 60 (2): 187-199.

ANEJOS

Anejos

Anejo I. Fotografías

Fotografía 1: Proceso de lijado en el galpón



Fotografía 2: Compresor de aire utilizado para eliminar el serrín residual



Fotografía 3: Equipo de medición Unislide TA 4020H1-S6 Velmex



Anejo II. Comandos de R: crecimientos radiales

#Se establece el espacio de trabajo 'work space' y se importan los datos:

```
setwd('C:/COFECHA')
data1<-read.csv('data1.csv',sep=';',dec=',',header=TRUE)
data2<-read.csv('data2.csv',sep=';',dec=',',header=TRUE)
```

#Se ejecutan los estadísticos descriptivos:

```
summary(data1$MEDIA_35)
sd(data1$MEDIA_35)
summary(data2$MEDIA_35)
sd(data2$MEDIA_35)
```

#Se efectúa el test de Shapiro-wilk para comprobar la normalidad:

```
shapiro.test(data1$MEDIA_35)
shapiro.test(data2$MEDIA_35)
```

#Se importan todos los datos juntos en la misma tabla y discriminados en función del rodal (caso 1 = SR100; caso 2 = SR200) para ejecutar el test de Bartlett de varianzas homogéneas:

```
datavar<-read.csv('datavar.csv',sep=';',dec=',',header=TRUE)
bartlett.test(datavar$media~datavar$caso)
```

#Se realiza la prueba T para verificar que existen diferencias significativas entre los crecimientos de uno y otro rodal:

```
t.test(datavar$media~datavar$caso)
```

#Por último se grafican los resultados:

```
hist(data1$MEDIA_35)
hist(data2$MEDIA_35)
boxplot(data1$MEDIA_35,data2$MEDIA_35)
qqnorm(data1$MEDIA_35)
qqline(data1$MEDIA_35)
qqnorm(data2$MEDIA_35)
qqline(data2$MEDIA_35)
```

Anejo III. Comandos de R: análisis dendroclimático

#La primera fase requiere instalar el paquete “dplR”:

```
install.packages("dplR")  
library(dplR)
```

#De esta manera podemos importar a R directamente las salidas de la medición una vez cofechadas:

```
SR100<-read.rwl('DatosSR100.txt')  
SR200<-read.rwl('DatosSR200.txt')
```

#Una vez importados los datos correctamente, se procede con la estandarización y la construcción de las cronologías residuales:

```
SR100.rwi<-detrend(SR100, method='Spline')  
SR100.rwi  
SR100.crn<-chron(SR100.rwi, prefix='100')  
SR100.crn  
crn.plot(SR100.crn)  
write.table(SR100.crn, file="SR100std.txt", quote=FALSE, sep='\t', row.names=TRUE,  
col.names=TRUE)  
SR200.rwi<-detrend(SR200, method='Spline')  
SR200.rwi  
SR200.crn<-chron(SR200.rwi, prefix='200')  
SR200.crn  
crn.plot(SR200.crn)  
write.table(SR200.crn, file="SR200std.txt", quote=FALSE, sep='\t', row.names=TRUE,  
col.names=TRUE)
```

#Terminada la estandarización y una vez guardada la tabla resultante, empieza el análisis puramente dendroclimático. Para ello se necesita instalar el paquete “bootRes”:

```
install.packages("bootRes")  
library(bootRes)
```

#Se introducen los datos generados con la estandarización y los datos climáticos:

```
SR100std<-read.table('SR100std.txt', header=TRUE)  
SR200std<-read.table('SR200std.txt', header=TRUE)  
ttclim.pre<-read.table('ppvm_pre.txt', header=TRUE)  
ttclim.tmp<-read.table('ppvm_tmp.txt', header=TRUE)  
ttclim.tmax<-read.table('ppvm_tmax.txt', header=TRUE)  
ttclim.tmin<-read.table('ppvm_tmin.txt', header=TRUE)
```

#Se ejecutan las funciones de correlación y se grafican los coeficientes de respuesta de cada rodal con respecto a cada una de las variables climáticas introducidas:

```
dc.corr.pre.100<-dcc(SR100std,ttclim.pre,method="correlation",start=-6,end=6)
```

```

=====| 100%
dc.corr.pre.100
dcplot(dc.corr.pre.100)
dc.corr.tmp.100<-dcc(SR100std,ttclim.tmp,method="correlation",start=-6,end=6)
=====| 100%
dc.corr.tmp.100
dcplot(dc.corr.tmp.100)
dc.corr.tmax.100<-dcc(SR100std,ttclim.tmax,method="correlation",start=-6,end=6)
=====| 100%
dc.corr.tmax.100
dcplot(dc.corr.tmax.100)
dc.corr.tmin.100<-dcc(SR100std,ttclim.tmin,method="correlation",start=-6,end=6)
=====| 100%
dc.corr.tmin.100
dcplot(dc.corr.tmin.100)
dc.corr.pre.200<-dcc(SR200std,ttclim.pre,method="correlation",start=-6,end=6)
=====| 100%
dc.corr.pre.200
dcplot(dc.corr.pre.200)
dc.corr.tmp.200<-dcc(SR200std,ttclim.tmp,method="correlation",start=-6,end=6)
=====| 100%
dc.corr.tmp.200
dcplot(dc.corr.tmp.200)
dc.corr.tmax.200<-dcc(SR200std,ttclim.tmax,method="correlation",start=-6,end=6)
=====| 100%
dc.corr.tmax.200
dcplot(dc.corr.tmax.200)
dc.corr.tmin.200<-dcc(SR200std,ttclim.tmin,method="correlation",start=-6,end=6)
=====| 100%
dc.corr.tmin.200
dcplot(dc.corr.tmin.200)

```

#Terminado el análisis de los rodales se repite el mismo proceso para los árboles individuales. Se incluyen aquí, a modo de ejemplo, únicamente los comandos para el árbol SR101, pues nada nuevo aportaría copiar los comandos de todos los árboles analizados:

```

SR101<-read.rwl('101.txt')
SR101.rwi<-detrend(SR101, method='Spline')
SR101.rwi
SR101.crn<-chron(SR101.rwi,prefix='101')
SR101.crn
write.table(SR101.crn, file="101std.txt", quote=FALSE, sep='\t', row.names=TRUE,
col.names=TRUE)
SR101std<-read.table('101std.txt', header=TRUE)
dc.corr.pre.101<-dcc(SR101std,ttclim.pre,method="correlation",start=-6,end=6)

```

```
|=====| 100%
dc.corr.pre.101
dcplot(dc.corr.pre.101)
dc.corr.tmp.101<-dcc(SR101std,ttclim.tmp,method="correlation",start=-6,end=6)
|=====| 100%
dc.corr.tmp.101
dcplot(dc.corr.tmp.101)
dc.corr.tmax.101<-dcc(SR101std,ttclim.tmax,method="correlation",start=-6,end=6)
|=====| 100%
dc.corr.tmax.101
dcplot(dc.corr.tmax.101)
dc.corr.tmin.101<-dcc(SR101std,ttclim.tmin,method="correlation",start=-6,end=6)
|=====| 100%
dc.corr.tmin.101
dcplot(dc.corr.tmin.101)
```


Anejo IV. Tabla resumen de árboles individuales

En esta tabla se muestra un resumen de las principales características de cada árbol. La edad está calculada a partir del año de instalación y el año de corta; la correlación es el índice resultante del cofechado, en la tabla se muestra el valor medio de los dos caminos medidos por cada rodaja; el crecimiento medio y el crecimiento acumulado están calculados a partir de los anchos de anillo anuales.

Grupo	Árbol	Edad (años)	Correlación (índice)	CM (mm/año)	CA (mm)
SR100	SR101	69	0,349	4,87	335,76
	SR102	59	0,258	5,44	320,60
	SR103	75	0,383	3,87	290,26
	SR104	77	0,236	3,91	300,90
	SR105	69	0,228	3,47	239,51
	SR106	74	0,270	5,29	391,57
	SR107	62	0,252	4,22	261,42
	SR108	65	0,509	7,01	455,74
SR200	SR202	69	0,559	2,75	190,01
	SR203	34	0,270	6,10	207,46
	SR204	93	0,678	2,76	257,07
	SR205	54	0,336	3,73	201,46
	SR206	85	0,555	2,97	252,05
	SR207	42	0,208	3,83	160,96
	SR208	61	0,295	5,48	334,31
	SR209	90	0,615	2,05	184,37
	SR210	87	0,595	1,93	168,18

* CM = Crecimiento medio anual en milímetros.

* CC = Crecimiento acumulado en milímetros.

