



## ANÁLISIS BIOMÉTRICO DE LA CORTEZA DE DIFERENTES PROCEDENCIAS DE PINUS HALEPENSIS: CARACTERIZACIÓN DE LA RESISTENCIA POTENCIAL AL FUEGO Y SU APLICACIÓN A PROGRAMAS DE RESTAURACIÓN POST-INCENDIO

### Máster Universitario en Restauración de Ecosistemas

**Presentado por:**

D./D<sup>a</sup> Sandra Martín Gómez

**Director:**

D. Javier Madrigal Olmo (Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria)

D. José María Climent Maldonado (Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria)

**Tutor académico:**

D. José Alfredo Bravo Fernández (Universidad de Politécnica de Madrid)

En Segovia a 30 de Octubre de 2020

## ÍNDICE

<b>Abstract</b> .....	1
<b>Resumen</b> .....	1
<b>Palabras clave</b> .....	2
<b>Introducción</b> .....	2
<b>Objetivos</b> .....	8
<b>Materiales y métodos</b> .....	9
<b>Procedencias y ecotipos</b> .....	10
<b>Análisis de imágenes</b> .....	12
<b>Análisis estadístico</b> .....	15
<b>Resultados</b> .....	16
<b>Variación alométrica entre la sección basal y normal</b> .....	16
<b>Estructura de la variación entre factores de clasificación</b> .....	19
<b>Variación intraespecífica entre ecotipos y procedencias</b> .....	21
<b>Procedencias - secciones a la altura normal</b> .....	23
<b>Discusiones</b> .....	27
<b>Variación alométrica entre la sección basal y a la altura del pecho</b> .....	27
<b>Estructura de la variación entre factores de clasificación</b> .....	28
<b>Variación intraespecífica entre ecotipos y procedencias</b> .....	29
<b>Procedencias -secciones a la altura normal</b> .....	29
<b>Conclusiones</b> .....	31
<b>Agradecimientos</b> .....	32
<b>Bibliografía</b> .....	33
<b>Referencias bibliográficas</b> .....	33
<b>Referencias web</b> .....	36

## **ABSTRACT**

Mediterranean forests are characterized by conditions that make them prone to forest fires, both surface and crown. Most of these fires have an anthropic origin and cause great environmental, social and economic damage. Pyrophytic species have been so influenced by fire that they have developed some mechanisms of adaptation to fire. The serotiny and the presence of a thick bark are two examples of adaptation to fires that are also antagonistic. The thickness of the bark is the most effective resistance adaptation and, consequently, the most studied to date. Unlike other investigations, we have made a distinction between the phloem and the outer bark through destructive sampling. We have worked specifically with the conifer *Pinus halepensis* in order to verify the existence of intraspecific variation in different aspects of this species. For this, we have analyzed the area and the perimeter of the xylem, the phloem and the cortex and the thickness of the phloem and the cortex through the images obtained from the basal sections and at chest height. We have determined the intraspecific variation between provenances and ecotypes of this species, obtaining as a result that provenance is the only factor that significantly influences some of the proposed variables of the normal sections. However, the ecotype has not been shown as a significant factor for any variable in either of the two analyzed sections. Finally, the results obtained have also allowed us to confirm that aleppo pine could be an interesting species to use in post-fire restoration.

## **RESUMEN**

Los bosques mediterráneos se caracterizan por unas condiciones que les hacen proclives a que tengan lugar incendios forestales, tanto superficiales como de copa. La mayoría de estos incendios tienen un origen antrópico y causan grandes daños ambientales, sociales y económicos. Las especies pirófitas son especies que se han visto tan influidas por el fuego que han desarrollado algunos mecanismos de adaptación a incendios. La serotinia y la presencia de una corteza gruesa son dos ejemplos de adaptación a incendios que, además, son antagónicos. El espesor de la corteza es la adaptación de resistencia más eficaz y, en consecuencia, la más estudiada hasta el momento. A diferencia de otros trabajos, nosotros hemos realizado una distinción entre el floema y la corteza externa mediante muestreo destructivo. Hemos trabajado concretamente con la conífera *Pinus halepensis* con el fin de comprobar la existencia de una variación intraespecífica en

diferentes aspectos de esta especie. Para ello hemos analizado el área y el perímetro del xilema, del floema y de la corteza y el espesor del floema y de la corteza a través de las imágenes obtenidas de las secciones basales y a la altura del pecho. Hemos determinado la variación intraespecífica entre procedencias y ecotipos de esta especie obteniendo como resultado que la procedencia es el único factor que influye de forma significativa en algunas de las variables propuestas de las secciones normales. Sin embargo, el ecotipo no se ha mostrado como un factor significativo para ninguna variable en ninguna de las dos secciones analizadas. Finalmente, los resultados obtenidos también nos han permitido confirmar que el pino carrasco podría ser una especie interesante a utilizar en la restauración post incendio.

**Palabras clave:** pino carrasco, incendios, alometría, diferenciación genética, procedencias.

## INTRODUCCIÓN

Los bosques mediterráneos están caracterizados por unas condiciones ambientales secas, una gran radiación y sequía estival, que, junto a los cambios de usos del suelo, al cambio climático y al aumento poblacional (Pausas, 2004; Moreira et al., 2011; Doblas-Miranda et al., 2015; Madrigal et al., 2019) está provocando en las últimas décadas un aumento en la frecuencia, extensión y severidad de los incendios (Fernandes, 2013; Madrigal et al., 2019; Sabaté et al., 2002, Doblas-Miranda et al., 2015). Los ecosistemas que no tienen una gran resistencia al fuego podrían ser aún más vulnerables con el aumento de la frecuencia e intensidad de los fuegos (Madrigal et al., 2019). El ochenta por ciento de la superficie quemada en Europa en el último decenio pertenece a países de la cuenca Mediterránea, principalmente a los países de Portugal, España, Francia, Italia, Grecia y Turquía, (WWF, [http://awsassets.wwf.es/downloads/wwf\\_\\_\\_informe\\_incendios\\_forestaales\\_2019\\_arde\\_el\\_mediterraneo\\_2019.pdf](http://awsassets.wwf.es/downloads/wwf___informe_incendios_forestaales_2019_arde_el_mediterraneo_2019.pdf)) donde los incendios forestales son uno de los mayores problemas ambientales (Velez, 1986; Maestre & Cortina, 2004) con graves consecuencias económicas y sociales, no solo ambientales.

Aunque España es el país que más fondos invierte en extinción por hectárea y tiene uno de los mejores sistemas de extinción a nivel mundial (WWF,

[https://wwfes.awsassets.panda.org/downloads/wwf\\_informe\\_incendios\\_2020\\_el\\_planeta\\_en\\_llamas.pdf?54921/Informe-incendios-forestales-2020-El-planeta-en-llamas](https://wwfes.awsassets.panda.org/downloads/wwf_informe_incendios_2020_el_planeta_en_llamas.pdf?54921/Informe-incendios-forestales-2020-El-planeta-en-llamas)), es el segundo país con mayor superficie quemada de Europa en el último decenio, debido, en parte, al aumento de la severidad de los incendios de los últimos años (WWF, [http://awsassets.wwf.es/downloads/wwf\\_\\_\\_informe\\_incendios\\_forestaales\\_2019\\_arde\\_el\\_mediterraneo\\_2019.pdf](http://awsassets.wwf.es/downloads/wwf___informe_incendios_forestaales_2019_arde_el_mediterraneo_2019.pdf)). El número de siniestros en España contabilizados por el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación se divide en conatos e incendios. Los conatos, hacen referencia a incendios con una superficie menor a una hectárea y los incendios son incendios de superficie de más de una hectárea. El total de siniestros en 2019 en España ha sido de 10.883 quemando 110.215,01 ha de superficie en total (teniendo en cuenta la suma de la superficie arbolada y la superficie forestal). A esta cifra hay que sumarle los 12 Grandes Incendios Forestales (es decir, aquellos incendios que superan las 50 hectáreas afectadas) que ocurrieron en el año 2019, afectando a un total de 28.551,42 ha. A pesar de la magnitud de las cifras, esta cantidad de siniestros es menor que la media de los últimos diez años donde el total de siniestros ha sido de 12.182 y la superficie total quemada fue de 129.680,19 ha (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, [https://www.mapa.gob.es/es/desarrollo-rural/estadisticas/avance\\_1\\_enero\\_31\\_diciembre\\_2019\\_tcm30-537398.pdf](https://www.mapa.gob.es/es/desarrollo-rural/estadisticas/avance_1_enero_31_diciembre_2019_tcm30-537398.pdf)).

A pesar de que los incendios naturales (aquellos producidos por las tormentas de verano) son habituales en gran parte del mundo, en el mediterráneo occidental este tipo de fuegos representa menos del cinco por ciento del total (Vázquez & Moreno, 1998), mientras que el resto de los incendios tienen un origen antropogénico (Ne'eman et al., 2004). Independientemente del origen, natural o antrópico, hay dos tipos de incendios: los denominados superficiales o de superficie y los de copa (Pausas, 2015). Los incendios superficiales avanzan por la superficie del monte quemando el combustible ligero de matorral, pastos, ramillas, hojarasca... (SECF, <http://secforestales.org/content/fuego-de-superficie>). Estos incendios avanzan más rápido que los de copa y, en consecuencia, no siempre se queman los árboles (Pausas, 2015). Por el contrario, en los incendios de copa los incendios avanzan por las copas de los árboles o arbustos y son relativamente independientes de los fuegos de superficie (SECF, <http://secforestales.org/content/fuego-de-copas>). En este último tipo de incendios las plantas se queman completamente (Pausas, 2015) aunque la supervivencia de los árboles varía dependiendo del tipo de incendio y de la resistencia del árbol. A nivel del árbol individual, la supervivencia depende del nivel

de protección de los tejidos y de la protección hidráulica y de la capacidad del árbol para reconstruir los tejidos dañados (Madrigal et al., 2019).

Los incendios forestales son una fuerza ecológica que ha influido en una gran cantidad de especies de plantas mediterráneas, las llamadas especies *pirófitas*, que han desarrollado mecanismos adaptativos frente al fuego para asegurar bien la supervivencia individual o la regeneración (reclutamiento) tras el incendio (Naveh, 1974; Ne'eman et al., 2004; Naveh, 2007; Dehane et al., 2015). Entre los mecanismos adaptativos de supervivencia individual se encuentra sobre todo la corteza gruesa, la autopoda y la capacidad de rebrote. En cuanto a la regeneración post-incendio, hay que destacar la formación de un banco aéreo de semillas ligado a una reproducción precoz y la presencia de frutos o conos serótinicos (esto es, que permanecen cerrados hasta que un factor desencadenante, normalmente altas temperaturas del incendio provocan su apertura y liberación de las semillas) (Pausas, 2015). En concreto, muchas especies de pinos presentan distintas adaptaciones (combinando uno o varios de los rasgos mencionados) según los regímenes de fuego predominantes. En primer lugar, se encuentran las especies sensibles al fuego (“evitadoras del fuego” *fire avoiders*) que no presentan adaptaciones singulares ni en supervivencia ni en reclutamiento, como por ejemplo *Pinus albicaulis* de EEUU o *P. cembra* en Europa. En segundo lugar, la estrategia denominada “tolerante al fuego” se da en regímenes de incendios superficiales de baja intensidad. Estas especies forman bosques densos, tienen la corteza basal gruesa y presentan autopoda. Estos árboles suelen ser altos con acículas delgadas y largas, carecen de serotinia y crecen rápidamente (el caso típico representativo de esta estrategia es *Pinus ponderosa* de EEUU o *Pinus nigra* en Europa). Por el contrario, las especies que han evolucionado en áreas con incendios de muy alta intensidad (*fire embracers* o “abrazadoras del fuego”) presentan reproducción precoz y han desarrollado una eficaz diseminación post-incendio. Como esta estrategia no se basa en la supervivencia individual sino en el reclutamiento eficaz post-incendio las cortezas son delgadas, como en el caso de *Pinus halepensis* (Pausas, 2015). En consecuencia, la serotinia y la presencia de corteza gruesa son caracteres relativamente antagónicos al representar estrategias de historia vital opuestas. Sin embargo, unas pocas especies (entre ellas el pino canario, *Pinus canariensis*), combinan ambos rasgos, además de la capacidad de rebrote.

La corteza gruesa, por tanto, es un rasgo fundamental para la supervivencia a incendios en los pinos con una estrategia de resistencia (Vines, 1968; Vines, 1981; Uhl & Kauffman,

1990; Pausas, 2015; Souto, 2016; Madrigal et al., 2019; Martín-Sanz et al., 2019). La corteza es la envoltura más externa del tronco de las plantas leñosas y protege a los tejidos internos. Está formada por dos partes, la corteza exterior muerta (que es la que tiene un papel protector frente a patógenos, fuegos de distinta intensidad y depredadores) y la corteza interior viva (Martín-Sanz et al., 2019). Inmediatamente debajo de la corteza se encuentra el cambium, que es el meristemo que genera el xilema y el floema y es particularmente sensible a las altas temperaturas (UVIGO, [https://mmegias.webs.uvigo.es/1-vegetal/guiada\\_v\\_meristemos.php](https://mmegias.webs.uvigo.es/1-vegetal/guiada_v_meristemos.php)). Además, si en caso de incendio el xilema fuera afectado, se podría producir un fallo hidráulico que desembocaría en la muerte del árbol (Ducrey et al., 1996; Midgley et al., 2011; Michaletz et al., 2012; Pausas, 2015). Si es el floema el tejido que se viese afectado por el incendio, el árbol también moriría ya que la muerte de este tejido provoca daños irreversibles en la planta. Esto se debe a que el floema es una capa tisular formada por células vivas en división activa durante el periodo vegetativo y es el responsable de translocar los carbohidratos obtenidos en la fotosíntesis a toda la planta (UNNE, <http://www.biologia.edu.ar/plantas/corteza.htm>). Un árbol puede morir sin que el fuego llegue a tocar el floema o el xilema porque el punto crucial en su supervivencia es el aumento de la temperatura dentro de la corteza y en el cambium (Costa et al., 1991). A pesar de las diferentes características que posee la corteza (densidad, gravedad específica, contenido de humedad, composición química, contenido de materia volátil, inflamabilidad y estructura física) se ha visto en numerosos estudios con diferentes árboles (que se encontraban en ecosistemas con diferentes regímenes de fuegos) que el espesor de la corteza es la propiedad de la misma más relacionada con la protección de los tejidos internos contra adversidades ambientales (Madrigal et al., 2019). El nivel de aislamiento térmico que proporciona la corteza externa (tanto a los tejidos conductores como a los meristemos), es proporcional al espesor absoluto, de tal forma que el grado de aislamiento se incrementa con el cuadrado del espesor (Midgley et al., 2010; Lawes et al., 2011; Martín-Sanz et al., 2019). Esto es fundamental porque a nivel individual de cada árbol, el hecho de que sobrevivan o no depende de lo bien que estén protegidos los tejidos colindantes con la corteza y de la reconstrucción tisular del árbol (Dehane et al., 2015). Además de la protección frente al fuego, la corteza aumenta la estabilidad mecánica de las ramas y de las plantas jóvenes ya que es una característica estructural clave (Rosell et al., 2014; Pausas, 2015; Martín-Sanz et al., 2019) y puede prevenir el embolismo en el

xilema que pueda tener lugar dentro del tronco a consecuencia de los incendios (Madrigal et al., 2019).

En esta investigación se ha trabajado con el pino carrasco *Pinus halepensis* Mill., Gard. Dict. ed. 8: n.º 8 (1768), que ha sido descrito tanto con una corteza delgada o como con una corteza moderadamente gruesa en distintos trabajos publicados (Pausas, 2015; Martín-Sanz et al., 2019). El pino carrasco, es el más extendido por las costas de España, Francia, Italia, Grecia, Turquía, Marruecos, Argelia y Túnez (Vélez, 1990; Torres et al., 1999) y es una de las especies arbóreas más estudiadas del ecosistema Mediterráneo (Ne'eman & Trabaud 2000; Ne'eman et al., 2004). *Pinus halepensis* es una especie intolerante a la sombra y xerófilo y muestra un crecimiento relativamente rápido, una reproducción precoz y sus acículas son más sensibles al fuego (Madrigal et al., 2019). El pino carrasco es una especie no rebrotadora y, por tanto, diseminadora obligada con una gran capacidad de regeneración debido al abundante banco de semillas aéreo que almacena, mediante el cual continúa su ciclo de vida. Las piñas serótinas que contienen el banco aéreo de semillas se abren a los 15 o 20 años de edad ante fenómenos extremos; generalmente los incendios, pero también debido a sequías intensas y altas temperaturas sin necesidad de fuego, lo que se conoce como *xeriscencia* (Ne'eman et al 2004). Las semillas liberadas son pequeñas, duras y con una ala relativamente grande que facilita la dispersión a larga distancia (Maestre & Cortina, 2004; Ne'eman et al., 2004; Tapias et al., 2004; Rossel et al., 2013; Pausas, 2015; Martín-Sanz et al., 2019).

Para comprender las respuestas genéticas al cambio climático en *Pinus halepensis* es necesario estudiar tanto la variación intraespecífica como la plasticidad fenotípica (Voltas et al., 2018). El pino carrasco, tiene una gran diferenciación ecotípica como posible respuesta adaptativa a distintos estresores abióticos, sobre todo sequía e incendios (Ne'eman et al., 2004; Schiller & Atzmon, 2009; Klein et al., 2011; Voltas et al., 2018). Los ensayos de procedencias multiambientales son fundamentales para poder comprender la interacción entre el genotipo y el ambiente (Voltas et al., 2018). Las poblaciones de esta especie que se encuentran en ambientes secos poseen características diferentes a las de otros ecosistemas más húmedos mediante variaciones anatómicas, morfológicas y fisiológicas a nivel intraespecífico (Voltas et al., 2018). Por su parte, la plasticidad fenotípica es la capacidad de un genotipo de desarrollar distintos fenotipos como respuesta a las condiciones ambientales (UGR, <http://www.ugr.es/~jmgreyes/plasticidad.html#:~:text=Plasticidad%20fenot%C3%ADpi>

ca% 20(PF)% 20es% 20la, expuesto% 20a% 20diferentes% 20condiciones% 20ambientales), es decir, es el efecto directo del ambiente en la expresión de los caracteres, evaluado por comparación entre sitios de ensayo de ambientes contrastados. Esta propiedad se ha estudiado tanto en serotinia como en espesor y proporción de la corteza (Martín-Sanz, 2018; Martín-Sanz et al., 2019). En ambos casos, el efecto de los ambientes más secos se ha interpretado como contra-adaptativo, esto es, disminuyendo tanto el banco aéreo de semillas como el espesor de corteza, lo que podría acarrear consecuencias negativas en los escenarios previstos de cambio climático.

A pesar de que la corteza de *Pinus halepensis* es en general delgada comparada con otros pinos, hay un patrón de variación muy marcado entre las secciones basales y a la altura del pecho (denominada altura normal): las basales son considerablemente más gruesas que las de pecho, con una diferencia más acusada que en otros pinos mediterráneos como *P. pinaster*, *P. brutia* o *P. pinea*. A 130 cm de altura (altura del pecho), además, es donde la variación entre procedencias es más significativa, con menores espesores hacia el suroeste del Mediterráneo y viceversa (Martín-Sanz et al., 2019). En general, se han estudiado más las secciones a la altura normal que las basales en caracteres de corteza por razones prácticas ya que los inventarios forestales se basan en medidas a 130 m. Sin embargo, la sección basal es fundamental para la supervivencia del árbol al paso de un incendio superficial, incluso de baja intensidad. Es por eso necesario hacer una distinción entre secciones basales y normales y analizarlas por separado para comprender las adaptaciones de *Pinus halepensis* frente al fuego.

A diferencia del resto de trabajos anteriores que se han basado en espesores de corteza total (que es la suma de corteza externa y floema) con calibradores de corteza (con el fin de realizar la estimación del árbol en vivo), en este trabajo se ha diferenciado por primera vez el floema de la corteza externa para comprobar la variación de cada tejido por separado gracias a un muestreo destructivo. Los patrones de variación del floema podrían tener más relación con los ecotipos definidos por sus características climáticas (Voltas et al., 2018), debido al papel del floema en el balance hídrico y al transporte de carbohidratos en el árbol (Hölttä et al., 2013; Savage et al., 2016) y los patrones de variación de la corteza podrían tener una mayor relación con las procedencias, adaptadas a distintos regímenes de incendios condicionados por factores tanto climáticos como geográficos (Voltas et al., 2018; Martín-Sanz et al., 2019).

Debido a la ausencia de trabajos que definan el espesor crítico (es decir, el grosor mínimo de la corteza para sobrevivir a los incendios) en *P. halepensis*, se han utilizado datos de otros trabajos donde se menciona tanto esta especie como otras genéticamente cercanas. A pesar de que las mediciones del grosor de la corteza a lo largo del tronco son relativamente comunes y se utilizan en inventarios forestales, hay muy pocos modelos que hayan trabajado el grosor de la corteza a lo largo del tronco de las coníferas europeas (Madrigal et al., 2019). En relación a las especies cercanas genéticamente al pino carrasco se ha visto que un espesor de un centímetro permite sobrevivir a incendios de baja intensidad (Van Mantgem & Schwartz, 2003; VanderWeide & Hartnett, 2011; Martín-Sanz et al., 2019), pero se ha comprobado que son dos centímetros el grosor mínimo necesario para sobrevivir a incendios de intensidad moderada en *Pinus pinea* (Ne'eman et al., 2004; Madrigal et al., 2019; Martín-Sanz et al., 2019) independientemente de la edad, altura y diámetro del tronco. No obstante, se han descrito poblaciones de pino carrasco que tienen un grosor de casi cuatro centímetros (Ne'eman et al., 2004). En estos estudios, en general, se han realizado mediciones exclusivamente a la altura normal (sin tener en cuenta la variabilidad del grosor de la corteza a lo largo del tronco) (Madrigal et al., 2019), a pesar de que en el pino carrasco el grosor mínimo se alcanza en la base con más frecuencia que a la altura normal (Martín-Sanz et al., 2019) e ignorando la importancia e implicación ecológica de las mediciones basales.

## **OBJETIVOS**

Como objetivo general, en este trabajo se pretende comprobar la siguiente hipótesis: existe una variación intraespecífica en la forma, superficie y espesor de la corteza en *P. halepensis*.

Para ello se trabajará en los siguientes objetivos específicos:

- 1) Estimar los parámetros biométricos de la corteza de *P. halepensis* mediante el estudio de rodajas basales y normales (a la altura del pecho) por separado extraídas de ensayos de procedencias.
- 2) Determinar la variación intraespecífica entre procedencias y ecotipos.
- 3) Desarrollar un protocolo de análisis de imagen reproducible para desarrollar este tipo de estudios en otras especies.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El material vegetal empleado en este estudio proviene de un ensayo de procedencias de *Pinus halepensis* plantado en Altura (Castellón) en 1997, identificado como P24CUC en la Red de Ensayos Genéticos Forestales GENFORED (<https://www.genfored.es>). El ensayo original consta de 53 procedencias de todo el área natural de la especie en el Mediterráneo, con una amplia representación de procedencias españolas (43). Debido a la elevada densidad de plantación (Figura 1), en 2019 se realizó una clara eliminando la mitad de los individuos. En concreto, en este trabajo se emplearon rodajas obtenidas en la base del árbol y a 130 cm (altura normal) a partir de esos individuos cortados.



Figura 1: aspecto del ensayo de procedencias en 2014 en Grecia, tras una poda de ramas bajas. Figura cedida por José M Climent.

## Procedencias y ecotipos

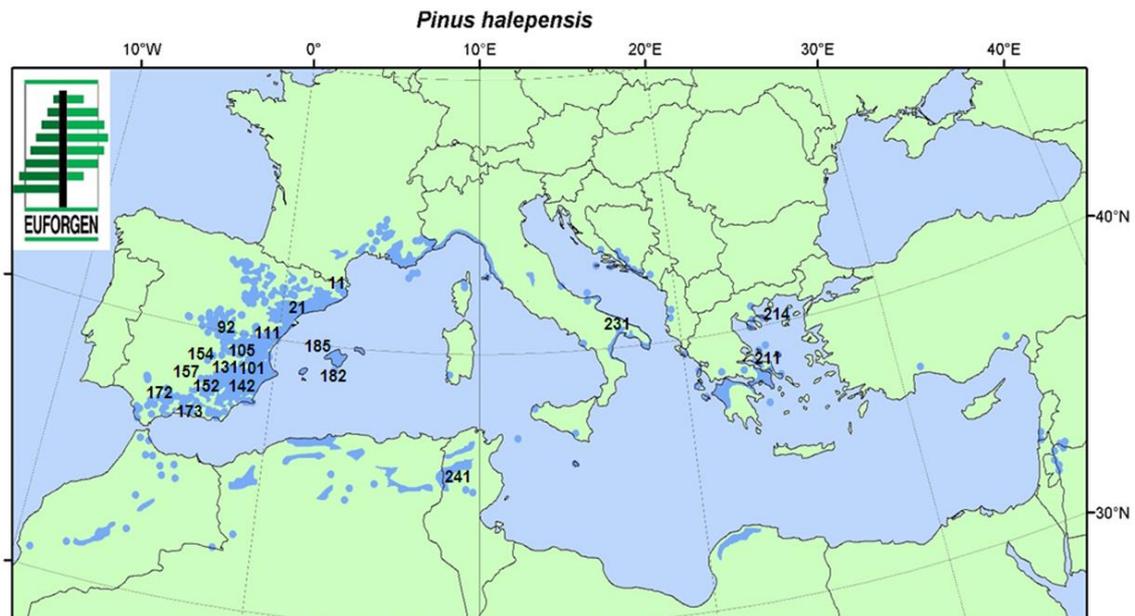


Figura 2: mapa con algunas de las procedencias utilizadas en este trabajo y en la investigación original. Figura cedida por José M. Climent.

En el mapa (Figura 2) se muestran las procedencias de *Pinus halepensis* de los que se han obtenido las secciones basales y normales con las que se ha trabajado en esta investigación. Estas procedencias representan gran parte del rango de distribución de la especie (Voltas et al., 2018). Sin embargo, no se encuentran marcadas todas las procedencias trabajadas en el mapa debido a la gran cantidad de procedencias y a las pequeñas dimensiones del mismo. Las procedencias son las siguientes: 221 en Francia, 211 y 214 en Grecia, 231 y 232 en Italia, 241 y 242 en Túnez, 182, 183, 184 y 185 en Baleares y en la Península Ibérica 11 y 21 en Cataluña, 61 en la Depresión del Ebro, 83 en Alcarría, 91 y 92 en Maestrazgo, 101 y 105 en el Levante Interior, 111 en el Levante Litoral, 131 y 142 en el Levante Meridional y 152, 154, 157, 172 y 173 en el Sur.

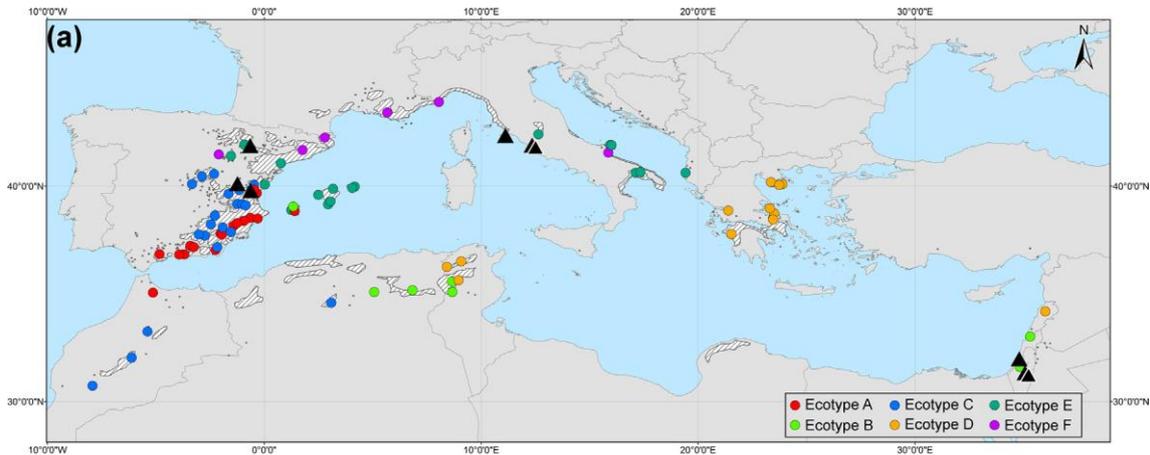


Figura 3: mapa con la ubicación geográfica de los ecotipos. Figura cedida por José M. Climent.

La clasificación en 6 ecotipos (Tabla 1) realizada por Voltas et al. (2018) se realizó teniendo en cuenta únicamente el ambiente. Las variables climáticas utilizadas se obtuvieron del conjunto de datos de la Unidad de Investigación Climática (CRU) y de la Base de datos WorldClim (Global Climatic Data) para el período 1960-1990. Las variables elegidas de cada base de datos se escogieron a partir de los impulsores climáticos de variación ecotípica en los pinos mediterráneos (Tapias et al., 2004; Climent et al., 2008; Voltas et al., 2018): la temperatura media anual, el rango anual de temperatura, la precipitación media anual y la precipitación media de verano. Los ecotipos obtenidos (Figura 3, Tabla 1) obtuvieron un tipo de clima particular según los tres criterios de Le Houerou (2004): (1) precipitación de verano (baja,  $\leq 60$  mm; media-alta,  $\geq 80$  mm), (2) temperatura de invierno (frío, entre  $-1$  y  $1$  °C; fresco, entre  $1$  y  $3$  °C; templado, entre  $3$  y  $5$  °C) y (3) precipitación anual (árido,  $\leq 400$  mm; semiárido, entre  $400$  y  $600$ ; subhúmedo,  $> 600$ ) (Voltas et al., 2018).

Tabla 1: descripción ambiental de los ecotipos.

Ecotipos	Definición
Ecotipo A	Semiárido-templado con verano seco
Ecotipo B	Árido-templado con verano seco
Ecotipo C	Semiárido-frío con verano seco
Ecotipo D	Subhúmedo-frío con verano seco
Ecotipo E	Semiárido-templado con verano húmedo
Ecotipo F	Subhúmedo-frío con verano húmedo

## Análisis de imágenes

Las secciones obtenidas en el muestreo se escanearon en laboratorio y las 328 imágenes resultantes (la mitad de la altura basal y la otra mitad de la altura normal) se analizaron utilizando el programa “ImageJ”. Este programa fue creado originalmente por Wayne Rasband en los años 70 y reescrito en 1987 a través de los NIH (National Institutes of Health). ImageJ es un programa de procesamiento y análisis de imágenes basado en Java (ImageJ, <https://imagej.net/ImageJ>). Este programa se puede descargar de forma gratuita independientemente de la plataforma original, es multiproceso y su código fuente es abierto e inclusivo, lo cual implica que la funcionalidad del programa puede cambiar según las necesidades del usuario (Schindelin et al., 2015).

Para realizar el análisis de las imágenes, una vez descargado y abierto el programa, seleccioné las medidas que quería obtener (Analyze→Set Measurements...), que en este caso fueron el área (Area) y el perímetro (Perimeter). La longitud no la seleccioné porque es una medida que se calcula por defecto en todas las mediciones. A continuación, añadí la imagen a analizar (File → Open) e introduje la escala utilizando la regla o la cuadrícula de la imagen. Para ello realicé una línea (\*Straight\*) en la medida conocida (un centímetro, el largo de la cuadrícula...) y seleccioné la escala (Analyze→ Set Scale) introduciendo la distancia conocida (Known distance) y la unidad de longitud (Unit of length). A continuación, realicé dos tipos de medidas diferentes para obtener por un lado los espesores de la corteza externa, los espesores de la corteza total y los espesores del floema y, por otro lado, el área y el perímetro del xilema, del floema y de la corteza.

En el caso de las áreas y perímetros accioné la herramienta “Wand” y seleccioné una parte cualquiera del xilema. A continuación, cliqué dos veces sobre la herramienta “Wand” y ajusté la tolerancia (Tolerance) con las flechas horizontales hasta obtener una circunferencia que delimita el borde del xilema, del floema y de la corteza en cada caso. Como son superficies irregulares, con la herramienta “\*Brush\* selections” ajusté las circunferencias a la forma correspondiente hasta obtener el perfil de cada sección: xilema (Figura 4), floema (Figura 5) y corteza (Figura 6). En el caso de la corteza suavicé los bordes (Figura 7) ya que la delimitación exacta de la misma sobreestimaba los datos reales. Finalmente, analicé las medidas (Analyze→Tools→ROI Manager→Add [t]→Measure). Una vez reuní todos los datos en una hoja de cálculo, hallé el área real del floema y el área real de la corteza. Para calcular este último es necesario realizar la siguiente resta: al área de la corteza le resté el área del floema. Para realizar el cálculo del

área real del floema hay que realizar la misma metodología: al área del floema hay que restarle el área del xilema.



Figura 4: la línea amarilla es la circunferencia realizada para medir el área y el perímetro del xilema.



Figura 5: la línea amarilla es la circunferencia realizada para medir el área y el perímetro del floema.



Figura 6: la línea amarilla es la circunferencia realizada para medir el área y el perímetro de la corteza.



Figura 7: comparación de la misma sección entre el perfil detallado de la corteza (derecha) y el perfil suavizado de la corteza (izquierda).

En el caso de los espesores superpuse dos rectángulos (Figura 8) con el programa Paint de tal forma que el punto donde se cruzan los dos rectángulos coincidiese con el centro de la sección y se obtuvieran cuatro líneas opuestas en forma de cruz. Para la medición del espesor seleccioné la herramienta “\*Straight\*” y dibujé una línea encima de una de las cuatro marcas. A continuación, realicé los pasos para medir este dato

(Analyze→Tools→ROI Manager→Add [t]→Measure) y lo repetí sobre cada una de las líneas. El dato resultante del espesor es el promedio de las cuatro medidas.

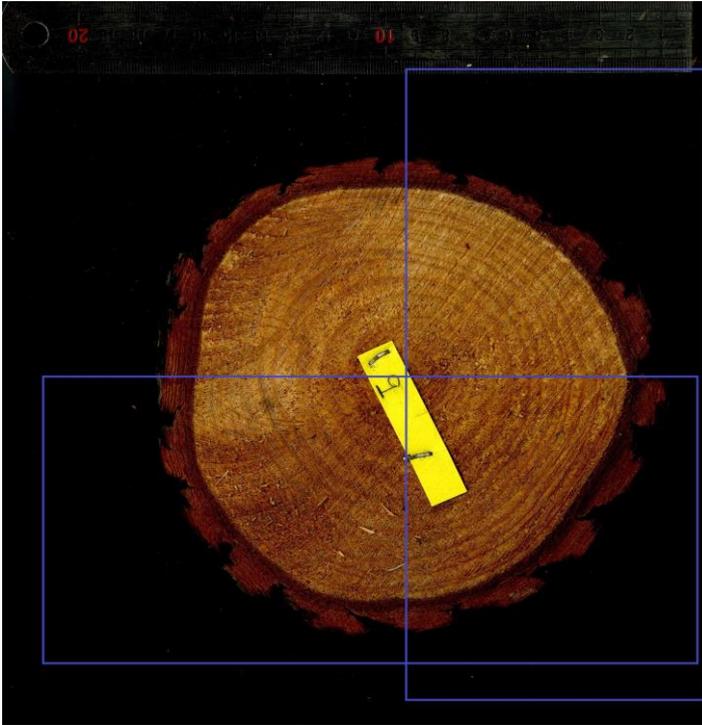


Figura 8: rectángulos para obtener los cuatro puntos de medición del espesor de la corteza.

Finalmente, también calculé el espesor medio del floema (esto es, asumiendo una forma de sector circular regular), a partir de la fórmula:

$$\text{Espesor del floema} = \sqrt{\left(\frac{\text{Area xilema} + \text{Area floema}}{(2\pi)}\right)} - \sqrt{\left(\frac{\text{Area xilema}}{(2\pi)}\right)}$$

Una vez obtenidos los datos, los incorporé a una hoja de cálculo donde se creará la base de datos para su análisis posterior mediante Excel y los programas estadísticos SPSS y R para testar la hipótesis.

### **Análisis estadístico**

Mediante el programa Excel realizamos los biplots entre pares de variables para entender la distinta alometría de los caracteres evaluados entre la sección basal y normal, así como una estadística descriptiva mediante correlaciones entre las variables de estudio. Con el programa SPSS realizamos árboles CHAID para observar el comportamiento de los datos

utilizando los dos tipos de sección, la procedencia, la región y el ecotipo. Finalmente, con el programa estadístico R realizamos, por una parte, diagramas de cajas con el fin de comprobar la variación intraespecífica entre los ecotipos y las procedencias. Para ello se realizaron gráficas de la distribución de diferentes variables según los ecotipos y según las procedencias por el tipo de sección: basal o normal. Las variables analizadas fueron: el porcentaje de floema, el porcentaje de corteza externa, el porcentaje de corteza total, la relación entre el perímetro y el área (perímetro/área) de la corteza, el espesor del floema, el espesor de la corteza externa y el espesor de la corteza total. Por otra parte, realizamos varios tests de Kruskal-Wallis para comprobar si los ecotipos y las procedencias tenían efectos significativos en las variables de estudio. Además, también realizamos modelos lineales generalizados (GLM) con los factores y las variables obtenidos en el mencionado test para saber para qué procedencias ofrecen diferencias significativas y predicen mejor el comportamiento de las variables de corteza estudiadas. Para la predicción de las variables respuesta se usó una distribución Gamma que se ajustó mejor a los datos que la función Gaussiana.

## **RESULTADOS**

### **Variación alométrica entre la sección basal y normal**

Las secciones basales (Figura 9) forman más corteza externa para el mismo área del xilema que las secciones a 130 cm (normales). En las secciones normales se forma menos corteza, la progresión casi llega a ser lineal y no observamos tendencia a curvarse en valores altos de área de xilema.

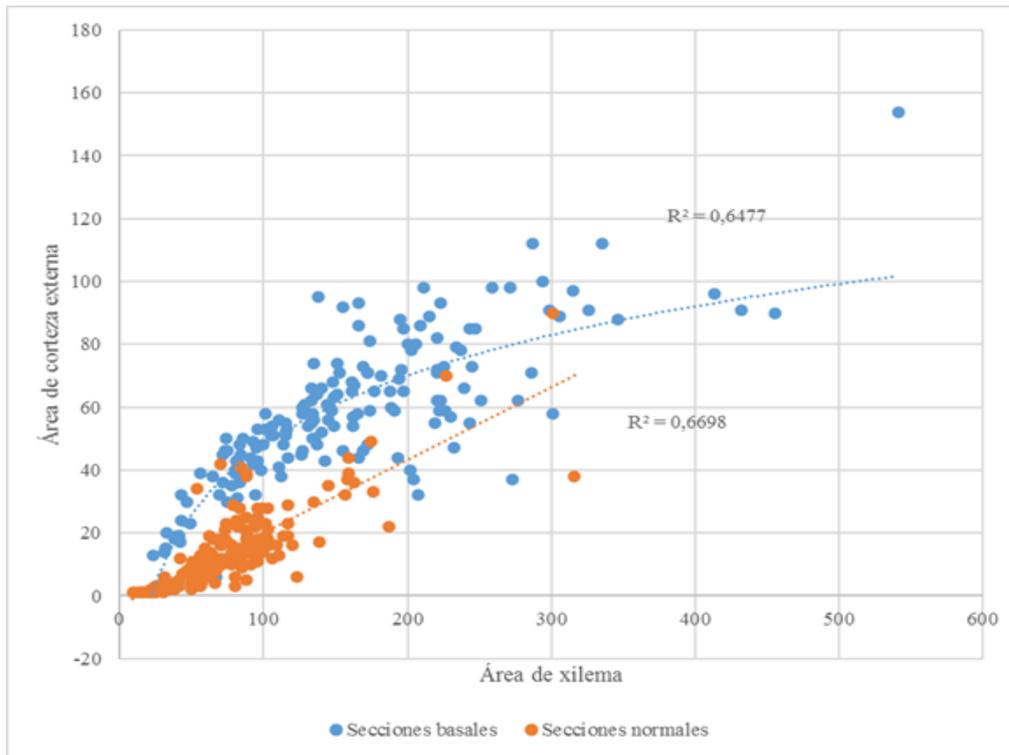


Figura 9: relación entre el área de la corteza y el área del xilema en las secciones basal (azul) y normal (naranja).

Contrastando con la diferente alometría del área de corteza y xilema entre secciones basal y normal, tanto en la relación del área y perímetro de la corteza externa (Figura 10) como en el perímetro de la corteza externa con respecto a la suma de las áreas del floema y de la corteza (corteza total) (Figura 11) las secciones basales y normales siguieron patrones de variación prácticamente idénticos.

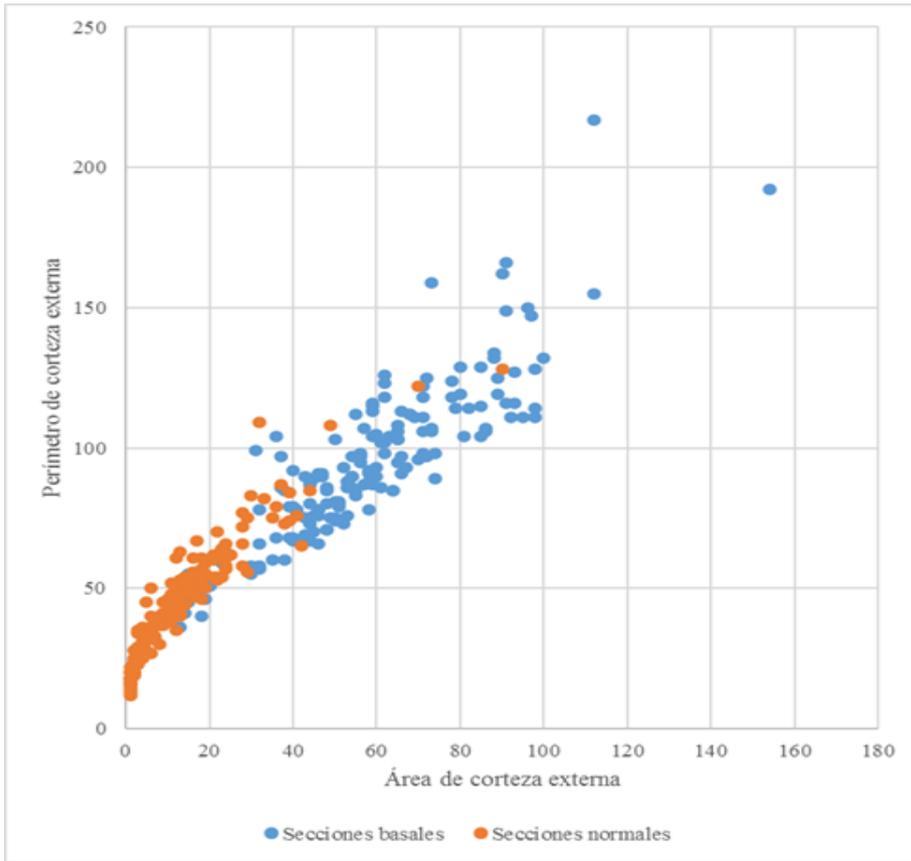


Figura 10: relación entre el perímetro de la corteza externa y el área de la corteza externa en las secciones basal (azul) y normal (naranja).

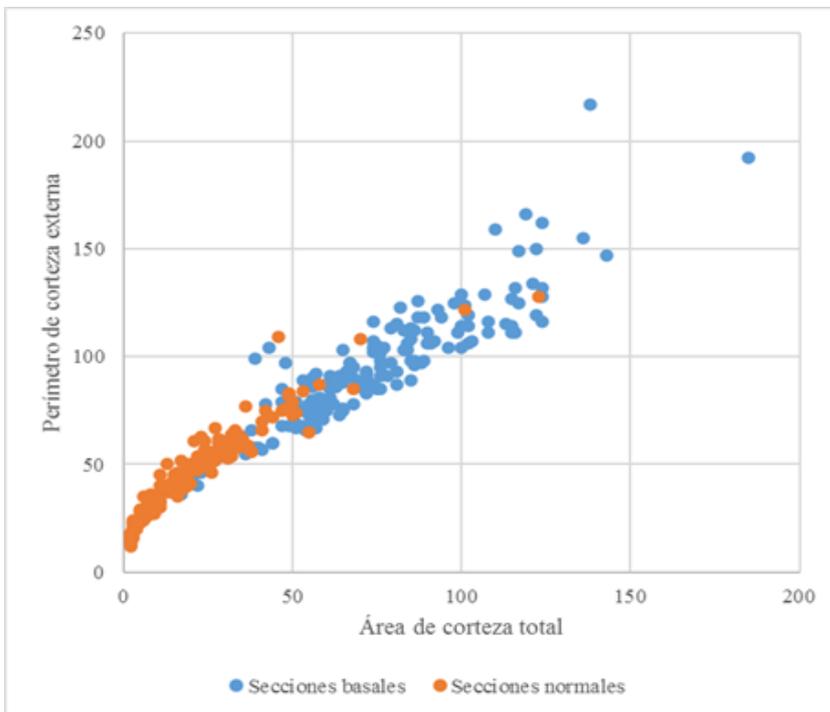


Figura 11: relación entre el perímetro de la corteza externa y la suma del área de la corteza total y del floema en las secciones basal (azul) y normal (naranja).

Por último, en cuanto a la relación alométrica entre espesor de floema y área de xilema de nuevo encontramos una notable diferencia entre la sección basal y normal, no sólo en la pendiente de esa relación (más acusada a la altura normal, esto es, un aumento del floema proporcionalmente mayor en relación al tamaño del xilema), sino en la intensidad de la relación, menos marcada en la sección basal (menor  $R^2$ ) (Figura 12).

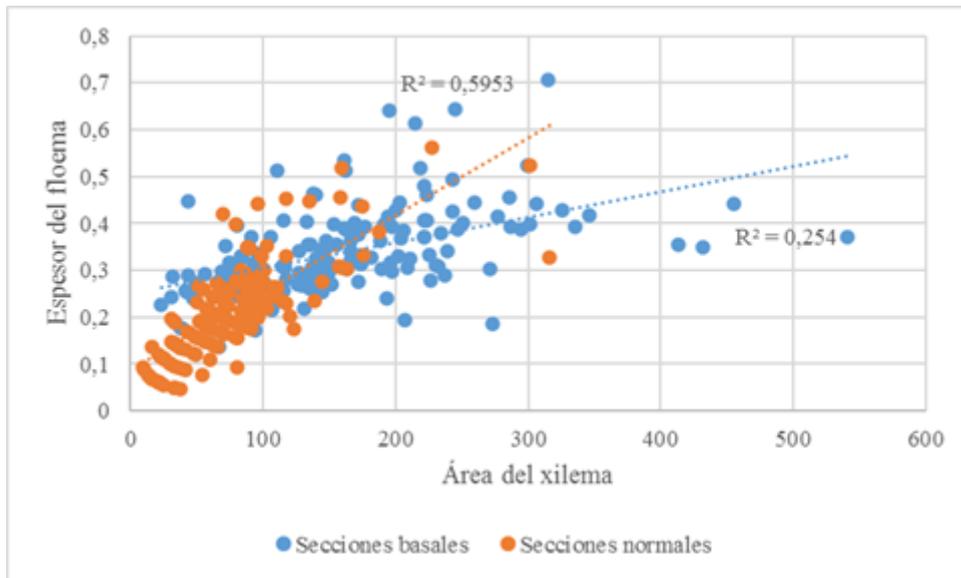


Figura 12: relación entre el espesor del floema y el área del xilema en las secciones basal (azul) y normal (naranja).

### **Estructura de la variación entre factores de clasificación**

En el primer dendograma para el porcentaje de corteza externa las clasificaciones se realizaron por tipo de sección, procedencia y región; es destacable que la primera división se produjo entre secciones basales y normales como cabría esperar (Figura 13). Dentro del tipo de sección, las secciones basales se estructuraron por región mientras que las normales se estructuraron por ecotipo.

En el segundo caso, con la variable perímetro/área de corteza (Figura 14) también se realizó una primera división en secciones basales y normales. Sin embargo, independientemente de la sección, la siguiente división que se realizó fue en regiones.

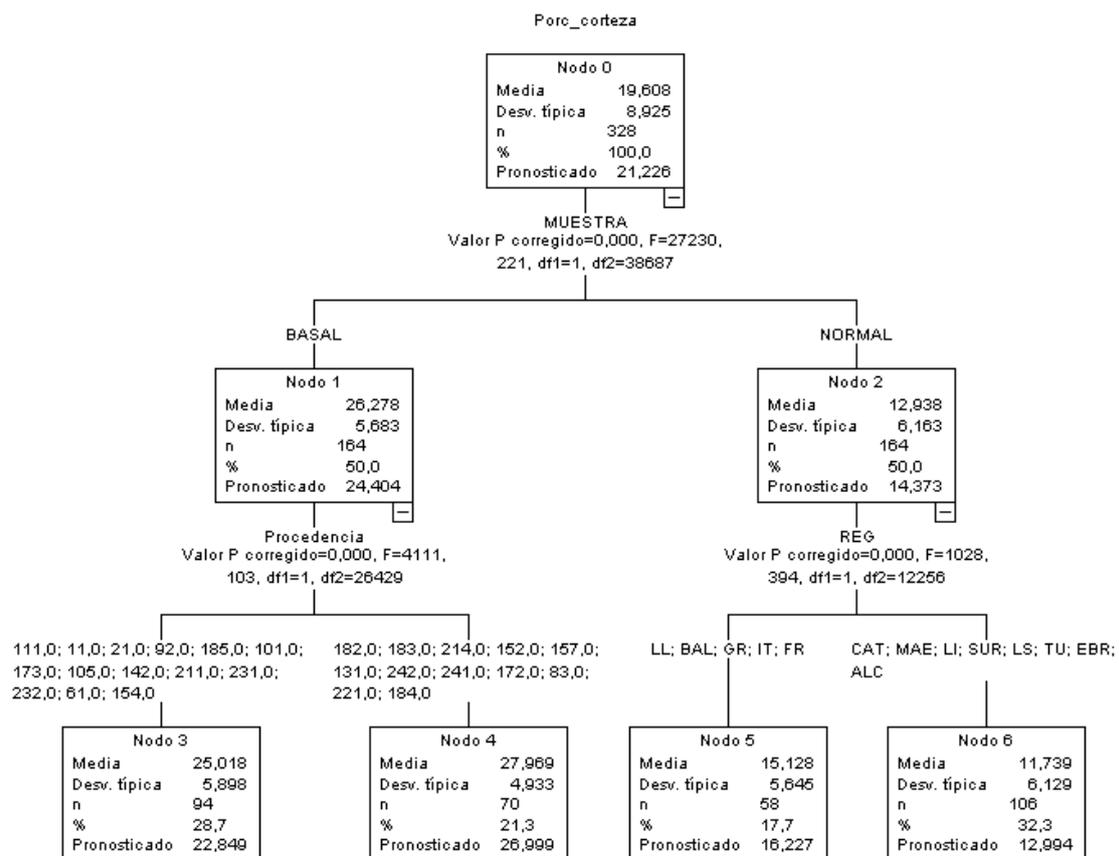


Figura 13: árbol CHAID exhaustivo para porcentaje de corteza incluyendo las secciones basales y las normales, la procedencia, la región y el ecotipo.

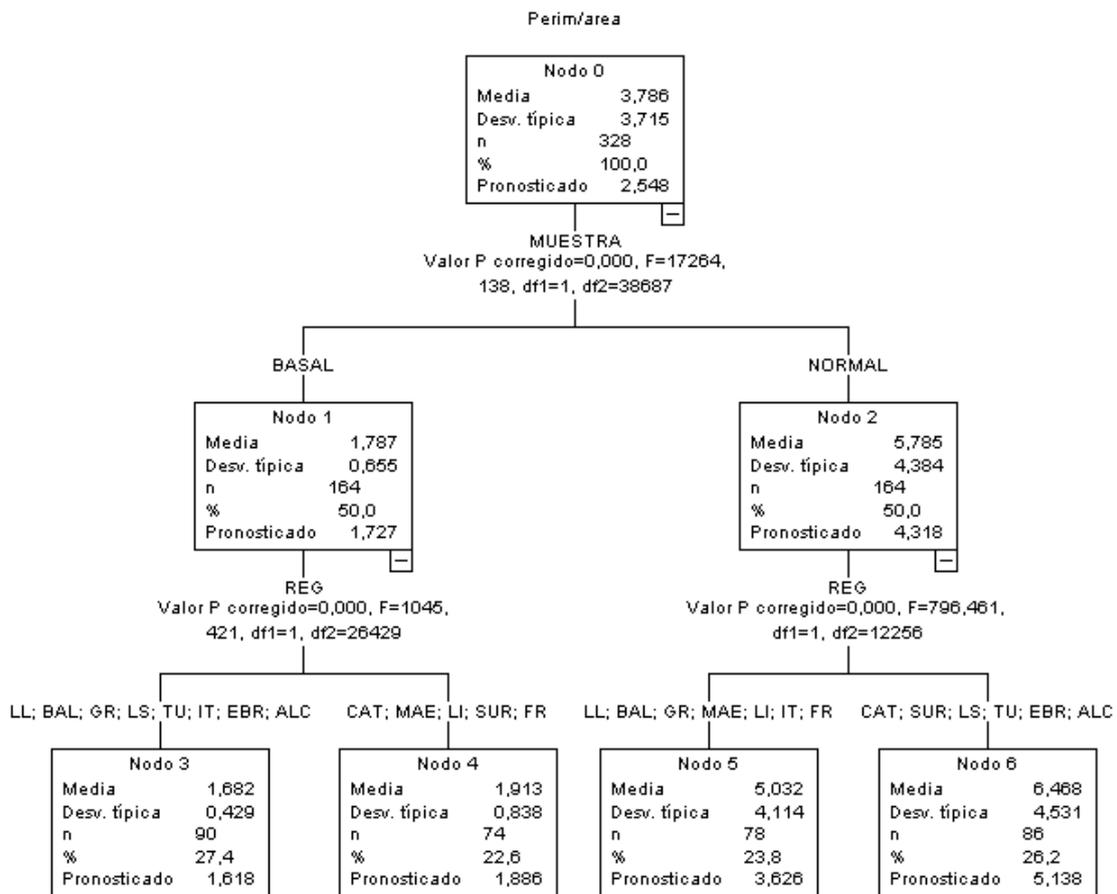


Figura 14: árbol CHAID para el perímetro/área incluyendo las secciones basales y las normales, la región y el ecotipo.

### **Variación intraespecífica entre ecotipos y procedencias**

Como resultado de los test de Kruskal-Wallis (Tabla 2) obtuvimos que el único factor que influyó de forma significativa (los valores de p de la tabla menores de 0,05) fue la procedencia. Este factor es significativo para las variables de espesor de corteza externa, espesor de corteza total, espesor de floema, perímetro/área de la corteza, porcentaje de corteza externa y porcentaje de corteza basal de las secciones normales. La variación en las secciones basales no tuvo efectos significativos ni de los ecotipos ni de las procedencias.

Tabla 2: Valores de p en el test de Kruskal-Wallis para comparar las variables biométricas estudiadas según la variación intraespecífica entre ecotipos y procedencias en las secciones basales y normales.

Altura de muestra	Clasificación	Espesor corteza externa (cm)	Espesor corteza total (cm)	Espesor floema (cm)	Perímetro/área corteza	Porcentaje corteza externa (%)	Porcentaje corteza total (%)	Porcentaje floema (%)
Basal	Ecotipo	0,2117	0,1488	0,3308	0,1764	0,9028	0,905	0,4019
Basal	Procedencia	0,7274	0,6401	0,6174	0,05075	0,4128	0,6513	0,8025
Normal	Ecotipo	0,2663	0,2011	0,2156	0,491	0,5301	0,2931	0,2767
Normal	Procedencia	<b>0,0373</b>	<b>0,0101</b>	<b>0,0103</b>	<b>0,0328</b>	<b>0,0129</b>	<b>0,0088</b>	0,1065

El resultado de los modelos GLM (Tabla 3) muestra para qué procedencias el modelo de regresión lineal utilizado se ajusta significativamente para las diferentes variables.

Tabla 3: Significación ( $p < 0,05$ ) de las procedencias para los modelos lineales generalizados (función de distribución Gamma) en las secciones normales de diferentes variables biométricas de corteza.

	Espesor corteza externa (cm)	Espesor corteza total (cm)	Espesor floema (cm)	Perímetro /área corteza	Porcentaje corteza externa (%)	Porcentaje corteza total (%)
Procedencia 111		0,0493				
Procedencia 173						0,04855
Procedencia 211		0,0487	0,01945		0,0278	0,00706
Procedencia 214		0,0267	0,00499		0,0166	0,00398
Procedencia 231			0,02438			

### Procedencias - secciones a la altura normal

El espesor de la corteza externa mostró una distribución heterogénea entre las diferentes procedencias adquiriendo un valor medio entre 0,1 y 0,8 cm. Los valores medios más altos pertenecían a las procedencias 214 y 173 y los valores medios más bajos pertenecían a las procedencias 172 y 242 (Figura 15). Los resultados del GLM (Tabla 3) mostraron que ninguna procedencia se ajustó significativamente al modelo de regresión lineal aplicado. El motivo de que esto ocurriese se debe a que, aunque las medias son muy diferentes entre sí, existe una alta variabilidad en la distribución de esta variable en la mayoría de las procedencias (Figura 15).

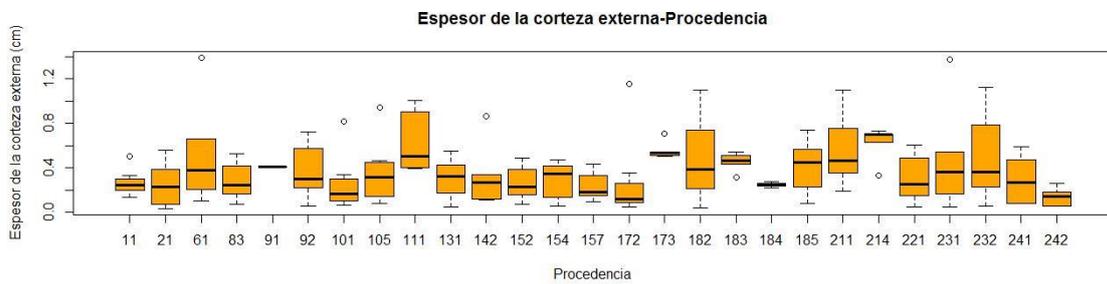


Figura 15: distribución del espesor de la corteza externa en centímetros en relación a las procedencias en las secciones a la altura normal.

El espesor de la corteza total presentó una distribución heterogénea entre las diferentes procedencias, con un valor medio entre 0,2 y 1,5 cm. Los valores medios más altos pertenecían a las procedencias 214 y 211 y los valores medios más bajos pertenecían a las procedencias 172 y 242 (Figura 16). Los resultados del GLM (tabla 3) mostraron que las procedencias 111, 211 y 214 tuvieron valores de espesor total de corteza significativamente más altos que el resto de las procedencias.

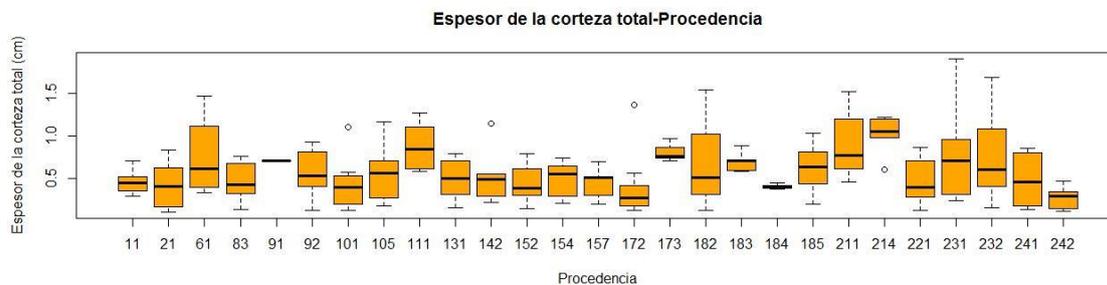


Figura 16: distribución del espesor de la corteza total en centímetros en relación a las procedencias en las secciones a la altura normal.

El espesor del floema mostró una distribución heterogénea entre las diferentes procedencias, con un valor medio entre 0,05 y 0,4 cm. Los valores medios más altos pertenecían a las procedencias 214 y 231 y los valores medios más bajos a las procedencias 172 y 182 (Figura 17). Los resultados del GLM (tabla 3) mostraron que las procedencias 211, 214 y 231 tuvieron valores significativamente más altos de espesor de floema.

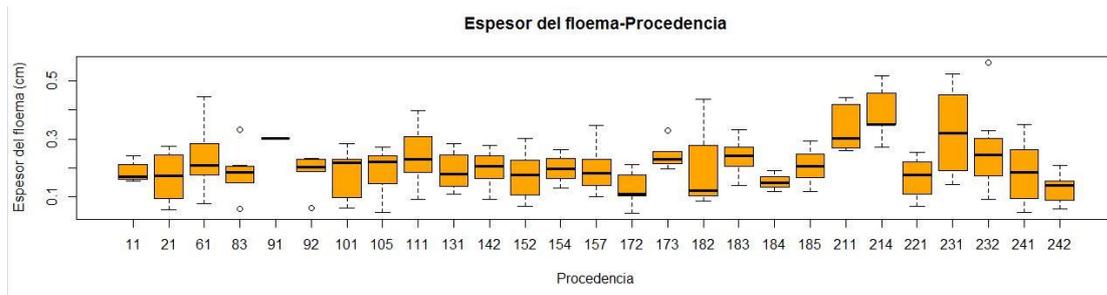


Figura 17: distribución del espesor del floema en centímetros en relación a las procedencias en las secciones a la altura normal.

La relación perímetro/área de la corteza presentó una distribución heterogénea entre las diferentes procedencias, adquiere un valor medio entre 2 y 10. Los valores medios más altos se dieron en las procedencias 242 y 172 y los valores medios más bajos en las procedencias 214 y 211 (Figura 18). Los resultados del GLM (Tabla 3) mostraron que ninguna procedencia se ajustó significativamente al modelo de regresión lineal aplicado ya que todas las procedencias tuvieron una media similar (Figura 18).

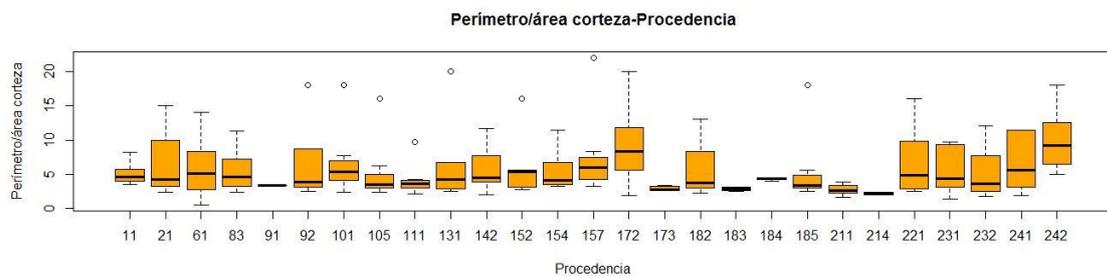


Figura 18: distribución de la relación perímetro/área de la corteza en relación a las procedencias en las secciones a la altura normal.

El porcentaje de la corteza externa mostró una distribución heterogénea entre las diferentes procedencias, con un valor medio entre 4 y 25%. Los valores medios más altos correspondieron a las procedencias 214 y 173 y los valores medios más bajos a las procedencias 242 y 172 (Figura 19). Los resultados del GLM (tabla 3) mostraron que las

procedencias 211 y 214 tuvieron los valores medios significativamente más altos del porcentaje de corteza externa.

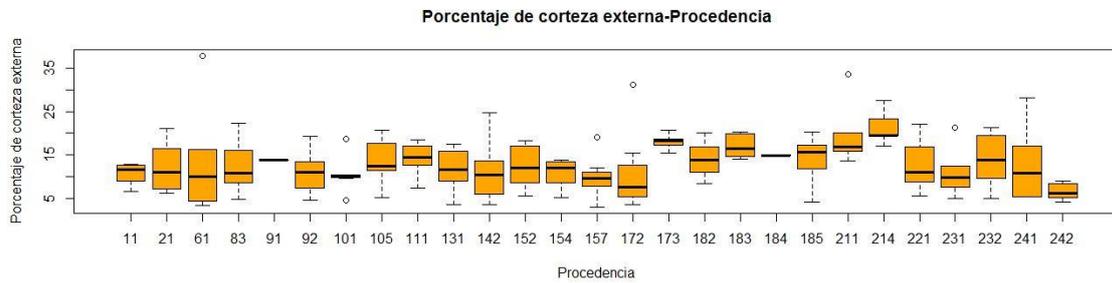


Figura 19: distribución del porcentaje de corteza externa en relación a las procedencias en las secciones a la altura normal.

El porcentaje de corteza total presentó una distribución heterogénea entre las diferentes procedencias, con un valor medio entre 10 y 40%. Los valores medios más altos pertenecen a las procedencias 214 y 173 y los valores medios más bajos pertenecen a las procedencias 242 y 172 (Figura 20). Los resultados del GLM (tabla 3) mostraron que las procedencias 173, 211 y 214 presentaron los mayores valores medios del porcentaje de corteza total con diferencias significativas respecto al resto de procedencias.

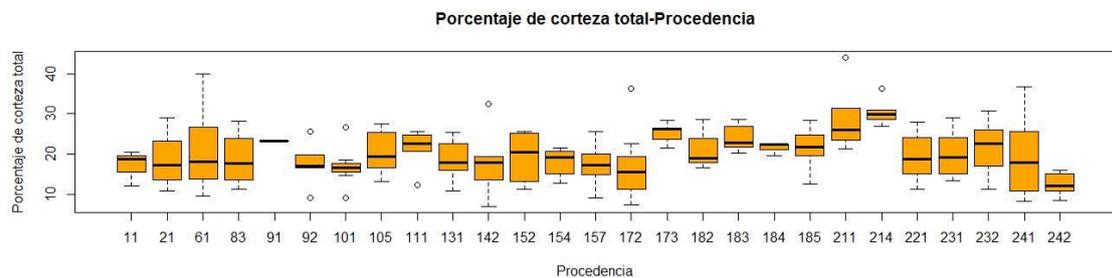


Figura 20: distribución del porcentaje de corteza total en relación a las procedencias en las secciones a la altura normal.

La procedencia 111 es una de las procedencias que se ajustó significativamente al modelo de regresión lineal y pertenece a la zona del Levante Litoral. A pesar de que solo se ajustó de forma significativa el espesor de la corteza total, es interesante resaltar que esta procedencia tiene uno de los valores más altos en la variable de espesor de corteza externa (Figura 15); también mostró uno de los valores más altos en la variable del espesor del floema (Figura 17), mientras que en el perímetro/área de la corteza tiene uno de los valores más bajos (Figura 18), lo cual implica que presenta un contorno regular o poco rugoso. En el porcentaje de corteza externa obtuvo un valor relativamente alto (Figura 19) y en la variable del porcentaje de corteza total también obtuvo un valor relativamente

alto (Figura 20). Todo ello indicaría que es una procedencia con una biometría que permitiría alta resistencia al fuego.

Otra de las procedencias que también se ajustó significativamente al modelo de regresión lineal fue la procedencia 173, la cual pertenece a la zona del Sur de la Península Ibérica, junto con las procedencias 152, 154, 157 y 172. Dentro de estas cinco procedencias, las tres primeras se encuentran lejos de la costa mientras que las procedencias 172 y 173 se encuentran más cerca del mar. A pesar de que sólo resultó significativo el porcentaje de corteza total en la procedencia 173, es interesante resaltar que la procedencia 152 obtuvo un valor intermedio en la variable de espesor de corteza externa, mientras que para esta misma variable las procedencias 154 y 173 obtuvieron valores altos y en cambio las procedencias 157 y 172 obtuvieron valores bajos (Figura 15).

En la variable espesor de corteza total las procedencias 152 y 172 obtuvieron valores bajos mientras que la procedencia 173 obtuvo uno de los valores más altos, seguida de las procedencias 154 y 157 (Figura 16).

Para el valor de espesor de floema las procedencias 152, 154 y 157 obtuvieron valores intermedios mientras que la procedencia 172 obtuvo uno de los menores valores y la procedencia 173 obtuvo uno de los mayores valores para esta variable (Figura 17).

Para la variable de perímetro/área de la corteza las variables 172, 157 y 152 obtuvieron valores altos, mientras que las procedencias 173 y 154 obtuvieron valores bajos (en mayor y menor medida respectivamente) (Figura 18). Para el valor del porcentaje de corteza externa la procedencia 173 obtuvo uno de los valores más altos, las procedencias 152 y 154 obtuvieron valores relativamente altos, la procedencia 157 obtuvo un valor medio y la procedencia 172 obtuvo un valor bajo (Figura 19).

Finalmente, para la variable del porcentaje de corteza total las procedencias 152 y 154 obtuvieron valores relativamente altos mientras que las procedencias 157 y 172 obtuvieron valores medios para esta variable (Figura 20).

Las procedencias 211 y 214 fueron dos de las procedencias que se ajustaron significativamente al modelo de regresión lineal y pertenecen a la zona de Grecia. Se ajustaron de forma significativa el espesor de la corteza total, el espesor del floema, el porcentaje de corteza externa y el porcentaje de corteza total y es interesante resaltar que en las dos procedencias se obtuvieron dos de los valores más altos de la variable espesor

de corteza externa (Figura 15). En la variable perímetro/área de la corteza se obtuvieron los valores más bajos para las procedencias 211 y 214 (Figura 18), lo que implicaría cortezas regulares más lisas y con menos fisuras.

La procedencia 231 fue la última de las procedencias que se ajustó significativamente al modelo de regresión lineal y pertenece, junto con la procedencia 232, a la zona de Italia. A pesar de que se ajustó de forma significativa el espesor del floema a la procedencia 231, es interesante resaltar que en las dos procedencias se obtuvieron valores relativamente altos de la variable espesor de corteza externa (Figura 15). En la variable espesor de corteza total las dos procedencias obtuvieron valores relativamente altos (Figura 16). En la variable espesor del floema la procedencia 232 obtuvo también un valor relativamente alto (Figura 17). En la variable de perímetro/área de la corteza se obtuvieron valores intermedios para ambas procedencias (Figura 18). En la variable del porcentaje de la corteza externa se obtuvieron valores medios para las dos variables (Figura 19) y, finalmente, en la variable porcentaje del floema total la procedencia 231 obtuvo un valor intermedio, mientras que la procedencia 232 obtuvo un valor relativamente alto (Figura 20).

## **DISCUSIÓN**

En este trabajo abordamos por primera vez el estudio de la variación intraespecífica en la corteza de *Pinus halepensis* diferenciando entre corteza externa y floema e incorporando la forma externa irregular, todo ello para las dos secciones de la base del tronco y la sección a la altura normal (130 cm).

### **Variación alométrica entre la sección basal y a la altura del pecho**

El hecho de que en las secciones basales se forme más corteza externa que las secciones normales para el mismo área (Figura 9), confirma que ambas secciones deben estudiarse por separado tal como se había propuesto por Martín-Sanz et al (2019). Además, observamos que la relación alométrica entre las variables tiende a disminuir, es decir, cada vez hay una menor relación entre el espesor del floema y el área del xilema (Figura 12). Esto explica que el espesor del floema sea bastante constante entre procedencias porque, aunque el área del xilema varíe, el espesor del floema no lo hace.

Por el contrario, la relación del perímetro de la corteza externa con el área de la corteza externa (Figura 10) y la relación entre el perímetro de la corteza externa con el área de corteza total (Figura 11) es muy similar entre ambas alturas de muestreo. Esto implica que, aunque en las secciones basales se forme más corteza que en las normales la morfología externa de la corteza en cuanto a irregularidad y fisuras es muy similar entre ambas alturas de muestreo.

Una de las consecuencias de estos resultados es la posibilidad de realizar más estudios sobre la corteza de *Pinus halepensis* sin necesidad de realizar secciones en el tronco, sino que se podrían estudiar los árboles en diferentes estadios de crecimiento o edad usando cronosecuencias o estudios diacrónicos (selección de árboles de diferentes edades o estadios de crecimiento).

### **Estructura de la variación entre factores de clasificación**

Los árboles de clasificación aplicados confirman de nuevo la distinta estructura de la variación entre la sección basal y normal.

La variación del porcentaje de corteza externa (Figura 13) indica que las secciones basales están más influidas por las procedencias, mientras que las normales lo están por la región geográfica, pero también por el ambiente. Esto implica que la variación observada en las secciones basales está influenciada por la historia evolutiva de la distribución de *Pinus halepensis*, donde entrarían procesos tanto adaptativos como de otro tipo (antigüedad de las poblaciones, introgresión de genes de *P. brutia* en poblaciones del Mediterráneo oriental, efectos fundadores, etc.) (Climent et al., 2008; Grivet et al., 2009). Sin embargo, la variación en la sección normal, además de estar influenciadas por la historia evolutiva de cada región geográfica, también están influenciadas por el ambiente de cada zona de origen. En el segundo dendrograma (Figura 14), aunque se mantiene la diferenciación entre la sección basal normal, la relación perímetro/área de la corteza en ambas alturas de muestreo viene determinada por las regiones, es decir, tanto por su historia como por el ambiente.

## **Variación intraespecífica entre ecotipos y procedencias**

### **Procedencias -secciones a la altura normal**

La variación de secciones ha sido más significativa en las de la altura normal como ya se ha mencionado anteriormente (Climent et al., 2008).

La procedencia 111 es la única procedencia de la zona del Levante Litoral que, además, se ajustó de forma significativa al modelo de regresión lineal aplicado con el GLM para la variable espesor de la corteza total. Este espesor adquiere unos valores medios significativamente más altos que otras procedencias y podría ser considerado como una probable adaptación a incendios de baja intensidad. Además, se vio que los ejemplares de la procedencia del Levante Litoral están caracterizados por un floema ancho y una corteza gruesa.

La procedencia 173 forma parte de la zona Sur de la Península Ibérica, junto con las procedencias 152, 154, 157 y 172, sin embargo, solo la procedencia 173 se ajustó de forma significativa al modelo de regresión lineal aplicado con el GLM para la variable del porcentaje de corteza total. Esta variable, en comparación con las otras procedencias, tiene unos valores altos por lo que el mayor porcentaje de corteza total es una probable adaptación a incendios más frecuentes de baja intensidad. Sin embargo, no todas las procedencias de la zona Sur tienen un porcentaje de corteza total alto ya que, aunque las procedencias 152 y 154 sí lo tienen, las procedencias 157 y 172 tienen un valor medio. Como los números de procedencias seguidos indican que las procedencias geográficamente son cercanas, hay que resaltar que las características entre las procedencias 152, 154 y 157 no son semejantes entre sí a excepción del espesor del floema donde las tres procedencias obtuvieron valores medios. La procedencia 152 se caracteriza por tener una corteza relativamente delgada y un floema relativamente ancho, la procedencia 154 se caracteriza por tener una corteza gruesa y un floema no muy ancho y la procedencia 157 se caracteriza por tener una corteza relativamente delgada y un floema grueso. A pesar de que las procedencias 152 y 157 están más separadas geográficamente se parecen más entre sí que con la procedencia 154.

Los contrastes entre procedencias de la zona Sur los pudimos observar de forma aún más contrastada en las procedencias 172 y 173, las cuales son completamente opuestas: la procedencia 172 se caracteriza por tener una corteza y un floema delgados mientras que la procedencia 173 se caracteriza por tener un floema y una corteza gruesas. Esto resalta

la evidencia de que a pesar de ser dos procedencias geográficamente muy próximas se caracterizan por poseer características completamente opuestas. Los árboles de estas dos procedencias tienen adaptaciones antagónicas frente a fuegos frecuentes y poco intensos porque la procedencia 172 es muy serótina y precoz reproductivamente mientras que la procedencia 173 es muy poco serótina y más tardía en términos reproductivos. Esto concuerda con que la serotinia y la corteza son adaptaciones complementarias y en cierta medida antagónicas (Pausas 2015).

Las procedencias 211 y 214 forman parte de la zona de Grecia y ambas se ajustaron de forma significativa al modelo de regresión lineal para las variables de espesor de corteza total, espesor de floema, porcentaje de corteza exterior y porcentaje de corteza total. Las procedencias griegas presentan un gran crecimiento en altura y diámetro y se consideran las poblaciones más antiguas de la especie en el Mediterráneo (Grivet et al., 2009). Las procedencias 231 y 232 forman parte de la zona de Italia y se ajustaron de forma significativa al modelo de regresión lineal para la variable de espesor de floema. Tal y como cabría esperar ambas procedencias se comportan de una forma semejante ya que tienen el floema y la corteza gruesos.

En todas las secciones normales de las procedencias analizadas se han obtenido potenciales adaptaciones en relación a la biometría de la corteza. Las procedencias 111, 173, 183, 211, 214 y 231 presentan mayor espesor y/o porcentaje de la corteza externa y/o total, en algunas también presentan mayor espesor y/o porcentaje de floema (211, 214 y 231), alta relación perímetro/área de la corteza (211, 214 y 242) y menor porcentaje de corteza externa y total (242).

Con respecto a las zonas se observa en el Levante Litoral un mayor espesor en la corteza externa y un mayor espesor en la corteza total; en Baleares un mayor porcentaje de corteza externa y un mayor porcentaje de corteza total y en Grecia un mayor espesor de la corteza externa y total y del floema, un mayor porcentaje de la corteza externa y la total y un menor perímetro/área de la corteza.

Puesto que en las zonas del norte y del este de la cuenca Mediterránea asignan menos recursos a la reproducción cabría esperar que dedicasen más recursos a la protección frente al fuego (Climent et al., 2008). Lo que observamos es que estas procedencias (211, 214 y 231) están caracterizadas por tener unas cortezas especialmente gruesas. Por el contrario, se esperaría que en las zonas del oeste y sur de la cuenca Mediterránea los

recursos defensivos frente al fuego sean menores ya que la estrategia se basa en la reproducción precoz en intensa y la serotinia. Sin embargo, lo que se observa en las dos procedencias analizadas en esta zona geográfica es que también poseen cortezas relativamente gruesas. No obstante, cabe destacar que la procedencia 172, a pesar de ser una procedencia que no se ha ajustado al modelo estadístico aplicado, hemos comprobado que sí se cumple esta hipótesis.

Los resultados obtenidos sugieren que *Pinus halepensis* parece estar adaptada a diferentes regímenes de fuego y siendo esta especie pionera e intolerante a la sombra, la hace especialmente interesante para utilizar en programas de restauración post-incendio. Los resultados obtenidos en relación a la biometría de la corteza sugieren seguir estudiando la resistencia al fuego de las cortezas de esta especie al igual que se ha hecho con otras del ámbito mediterráneo (Madrigal et al., 2019) para determinar aquellas procedencias con mayor potencial para resistir el paso del fuego en un escenario de mayor frecuencia de incendios. Si bien la estrategia predominante en la especie es la denominada *fire embracing* (Pausas, 2015), la variación intraespecífica incluye algunas procedencias con rasgos de tolerancia a fuegos de baja intensidad, lo que podría tener gran importancia si la elección del material genético se combina con un manejo adecuado a sus características de historia vital.

Dado que la corteza es todavía una de las partes menos estudiadas del tronco de los árboles, se debería continuar con este tipo de estudios para diferenciar la plasticidad fenotípica por separado de las diferentes genéticas del grosor de la corteza con el fin de mejorar la comprensión que se tiene de las compensaciones de la corteza que podrían limitar la evolución adaptativa de los árboles en un clima cambiante (Martín-Sanz et al., 2019). Para ello, se deberían aumentar los registros de los inventarios forestales de las coníferas europeas ya que es fundamental cuantificar en mejor medida el efecto protector que posee la corteza para poder prever los daños producidos por los incendios forestales.

## CONCLUSIONES

- La estimación de los parámetros biométricos de la corteza de *P. halepensis* mediante el estudio de rodajas basales y normales extraídas de ensayos de procedencias, la determinación de la variación intraespecífica entre procedencias y ecotipos y el desarrollo de un protocolo de análisis de imagen reproducible para

desarrollar este tipo de estudios en otras especies han permitido ratificar la hipótesis de que existe una variación intraespecífica en la forma, superficie y espesor de la corteza en *P. halepensis*.

- Se confirma la existencia de diferencias fenotípicas entre las diferentes procedencias en la biometría de las cortezas.
- El ecotipo no se ha mostrado como un factor significativo en la diferenciación de parámetros biométricos de la corteza. Como *Pinus halepensis* parece estar adaptada a diferentes regímenes de fuego y esta especie es pionera e intolerante a la sombra, sería una especie interesante para utilizar en restauraciones post-incendio. En consecuencia, sería interesante realizar estudios de laboratorio con secciones del tronco de *Pinus halepensis* con el fin de determinar cuál sería el grosor mínimo al que esta especie se vería afectada con los incendios frecuentes y poco intensos para poder escoger correctamente las variedades a utilizar en ese proyecto.
- En una restauración post-incendio habría que elegir las procedencias con el material genético y las características pirófitas adecuadas, es decir, aquellas procedencias donde se ha obtenido con una corteza gruesa, como la 211 y la 214.

## **AGRADECIMIENTOS**

La autora de este trabajo quiere agradecer la posibilidad de realizar este trabajo al proyecto de I + D aprobado del INIA <<Vulnerabilidad integral de los sistemas forestales frente a incendios: implicaciones en las herramientas de gestión forestal “VIS4FIRE”>>, al proyecto RESILPINE y al convenio de colaboración INIA-UCM que ha hecho posible la realización del mismo; además del personal del INIA que han hecho más interesantes mis cortas pero enriquecedoras prácticas allí. Finalmente, quiero agradecer a mis tutores Javier Madrigal y José M. Climent por su profesionalidad y apoyo en el transcurso de este trabajo.

## BIBLIOGRAFÍA

### Referencias bibliográficas

- Climent, J., Prada, M. A., Calama, R., Chambel, M. R., De Ron, D. S., & Alía, R. 2008. To grow or to seed: ecotypic variation in reproductive allocation and cone production by young female Aleppo pine (*Pinus halepensis*, Pinaceae). *American Journal of Botany*, 95(7): 833-842.
- Costa, J. J., Oliveira, L. A., Viegas, D. X., & Neto, L. P. (1991). On the temperature distribution inside a tree under fire conditions. *International Journal of Wildland Fire*, 1(2), 87-96.
- Dehane, B., Madrigal, J., Hernando, C., Bouhraoua, R., & Guijarro, M. 2015. New bench-scale protocols for characterizing bark flammability and fire resistance in trees: application to Algerian cork. *Journal of Fire Sciences*, 33(3): 202-217.
- Ducrey, M., Duhoux, F., Huc, R., & Rigolot, E. 1996. The ecophysiological and growth responses of Aleppo pine (*Pinus halepensis*) to controlled heating applied to the base of the trunk. *Canadian Journal of Forest Research*, 26(8): 1366-1374.
- Fernandes, P. M. 2013. Fire-smart management of forest landscapes in the Mediterranean basin under global change. *Landscape and Urban Planning*, 110: 175-182.
- Grivet, D., Sebastiani, F., González-Martínez, S.C. & Vendramin, G.G. 2009. Patterns of polymorphism resulting from long range colonization in the Mediterranean conifer Aleppo pine. *New Phytologist* 184: 1016–1028.
- Hölttä, T., Kurppa, M. & Nikinmaa, E. 2013. Scaling of xylem and phloem transport capacity and resource usage with tree size. *Frontiers in Plant Science* 4: 1–19.
- Klein, T., Cohen, S., & Yakir, D. 2011. Hydraulic adjustments underlying drought resistance of *Pinus halepensis*. *Tree physiology*, 31(6): 637-648.
- Le Houerou, H. N. 2004. An agro-bioclimatic classification of arid and semiarid lands in the isoclimatic Mediterranean zones. *Arid land research and management*, 18(4): 301-346.
- Lawes, M. J., Richards, A., Dathe, J., & Midgley, J. J. 2011. Bark thickness determines fire resistance of selected tree species from fire-prone tropical savanna in north Australia. *Plant Ecology*, 212(12): 2057-2069.

- Madrigal, J., Souto-García, J., Calama, R., Guijarro, M., Picos, J., & Hernando, C. 2019. Resistance of *Pinus pinea* L. bark to fire. *International Journal of Wildland Fire*, 28(5): 342-353.
- Maestre, F. T., & Cortina, J. 2004. Are *Pinus halepensis* plantations useful as a restoration tool in semiarid Mediterranean areas?. *Forest Ecology and Management*, 198(1-3): 303-317.
- Martín Sanz, R. C. (2018). Evolutionary ecology of fire-adaptive traits in a Mediterranean pine species.
- Martín-Sanz, R. C., San-Martín, R., Poorter, H., Vázquez, A., & Climent, J. 2019. How does water availability affect the allocation to bark in a Mediterranean conifer?. *Frontiers in plant science*, 10: 607.
- Michaletz, S. T., Johnson, E. A., & Tyree, M. T. 2012. Moving beyond the cambium necrosis hypothesis of post-fire tree mortality: cavitation and deformation of xylem in forest fires. *New Phytologist*, 194(1): 254-263.
- Midgley, J. J., Lawes, M. J., & Chamaillé-Jammes, S. 2010. Savanna woody plant dynamics: the role of fire and herbivory, separately and synergistically. *Australian Journal of Botany*, 58(1): 1-11.
- Midgley, J. J., Kruger, L. M., & Skelton, R. 2011. How do fires kill plants? The hydraulic death hypothesis and Cape Proteaceae “fire-resisters”. *South African Journal of Botany*, 77(2): 381-386.
- Moreira, F., Viedma, O., Arianoutsou, M., Curt, T., Koutsias, N., Rigolot, E., Barbati, A., Corona, P., Vaz, P., Xanthopoulos, G., Mouillot, F., & Bilgili, E. 2011. Landscape–wildfire interactions in southern Europe: implications for landscape management. *Journal of environmental management*, 92(10): 2389-2402.
- Naveh, Z. 1974. Effects of fire in the Mediterranean region. *Fire and ecosystems*, 321: 401-434.
- Naveh, Z. 2007. Fire in the Mediterranean—A landscape ecological perspective. En: *Transdisciplinary Challenges in Landscape Ecology and Restoration Ecology*. Décamps, H., Tress, B. & Tress, G. Países Bajos, Springer, 95-116 pp.
- Ne'eman, G., & Trabaud, L. 2000. *Ecology, biogeography and management of Pinus halepensis and P. brutia forest ecosystems in the Mediterranean Basin*. Leiden, Países Bajos: Backhuys Publishers. 407 pp.
- Ne'eman, G., Goubitz, S., & Nathan, R. 2004. Reproductive traits of *Pinus halepensis* in the light of fire—a critical review. *Plant Ecology*, 171(1-2): 69-79.

- Pausas, J. G. 2004. La recurrencia de incendios en el monte mediterráneo. *Avances en el estudio de la gestión del monte mediterráneo*, 47-64.
- Pausas, J. G. 2015. Bark thickness and fire regime. *Functional Ecology*, 29(3): 315-327.
- Rosell, J. A., Gleason, S., Méndez-Alonzo, R., Chang, Y., & Westoby, M. 2014. Bark functional ecology: evidence for tradeoffs, functional coordination, and environment producing bark diversity. *New Phytologist*, 201(2): 486-497.
- Sabaté, S., Gracia, C. A., & Sánchez, A. 2002. Likely effects of climate change on growth of *Quercus ilex*, *Pinus halepensis*, *Pinus pinaster*, *Pinus sylvestris* and *Fagus sylvatica* forests in the Mediterranean region. *Forest ecology and management*, 162(1): 23-37.
- Savage, J.A., Clearwater, M.J., Haines, D.F., Klein, T., Mencuccini, M., Sevanto, S., Turgeon, R. & Zhang, C. 2016. Allocation, stress tolerance and carbon transport in plants: How does phloem physiology affect plant ecology? *Plant Cell and Environment* 39: 709–725.
- Schiller, G., & Atzmon, N. 2009. Performance of Aleppo pine (*Pinus halepensis*) provenances grown at the edge of the Negev desert: a review. *Journal of Arid Environments*, 73(12): 1051-1057.
- Schindelin, J., Rueden, C. T., Hiner, M. C., & Eliceiri, K. W. 2015. The ImageJ ecosystem: An open platform for biomedical image analysis. *Molecular reproduction and development*, 82(7-8): 518-529.
- Souto, J. 2016. *Inflamabilidad de la corteza y evaluación de la resistencia al fuego de Pinus pinea L.* (trabajo de fin de grado). Universidad de Vigo, Vigo, España.
- Tapias, R., Climent, J., Pardos, J. A., & Gil, L. 2004. Life histories of Mediterranean pines. *Plant ecology*, 171(1-2): 53-68.
- Torres, J. A., Garcia-Fuentes, A., Salazar, C., Cano, E., & Valle, F. 1999. Caracterización de los pinares de *Pinus halepensis* Mill, en el sur de la Península Ibérica. *Ecologia mediterranea*, 25(2): 135-146.
- Uhl, C., & Kauffman, J. B. 1990. Deforestation, fire susceptibility, and potential tree responses to fire in the eastern Amazon. *Ecology*, 71(2): 437-449.
- Van Mantgem, P., & Schwartz, M. 2003. Bark heat resistance of small trees in Californian mixed conifer forests: testing some model assumptions. *Forest Ecology and Management*, 178(3): 341-352.

- VanderWeide, B. L., & Hartnett, D. C. 2011. Fire resistance of tree species explains historical gallery forest community composition. *Forest Ecology and Management*, 261(9): 1530-1538.
- Vázquez, A., & Moreno, J. M. 1998. Patterns of lightning-, and people-caused fires in peninsular Spain. *International Journal of Wildland Fire*, 8(2): 103-115.
- Velez, R. 1986. Fire prevention in Aleppo pine forests. *Paris: CIHEAM Options Méditerranéennes : Série Etudes*. 1986-I: 167-178.
- Vélez, R. 1990. Los incendios forestales en el Mediterráneo: perspectiva regional. *Revista Unasyva*, 41(162): 3-9.
- Vines, R. G. 1968. Heat transfer through bark, and the resistance of trees to fire. *Australian Journal of Botany*, 16(3): 499-514.
- Vines, R. G. 1981. Physics and chemistry of rural fires [control applications; review]. In *Conference on Fire and the Australian Biota, Canberra (Australia), 9 Oct 1978*. Australian Academy of Science.
- Voltas, J., Shestakova, T. A., Patsiou, T., Di Matteo, G., & Klein, T. 2018. Ecotypic variation and stability in growth performance of the thermophilic conifer *Pinus halepensis* across the Mediterranean basin. *Forest ecology and management*, 424: 205-215.

### **Referencias web**

- Genfored. Red de Ensayos Genéticos Forestales. Obtenido el 1 de octubre del 2020 en <https://www.genfored.es/>.
- ImageJ. Obtenido el 26 de octubre del 2020 en <https://imagej.net/ImageJ>.
- Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Obtenido el 20 de octubre del 2020 en [https://www.mapa.gob.es/es/desarrollo-rural/estadisticas/avance\\_1\\_enero\\_31\\_diciembre\\_2019\\_tcm30-537398.pdf](https://www.mapa.gob.es/es/desarrollo-rural/estadisticas/avance_1_enero_31_diciembre_2019_tcm30-537398.pdf).
- SECF. Sociedad Española de Ciencias Forestales. Obtenido el 28 de septiembre del 2020 en <http://secforestales.org/content/fuego-de-copas>.
- SECF. Sociedad Española de Ciencias Forestales. Obtenido el 28 de septiembre del 2020 en <http://secforestales.org/content/fuego-de-superficie>.
- UGR. Universidad de Granada. Obtenido el 26 de octubre del 2020 en [http://www.ugr.es/~jmgreyes/plasticidad.html#:~:text=Plasticidad%20fenot%C3%A9pica%20\(PF\)%20es%20la,expuesto%20a%20diferentes%20condiciones%20ambientales..](http://www.ugr.es/~jmgreyes/plasticidad.html#:~:text=Plasticidad%20fenot%C3%A9pica%20(PF)%20es%20la,expuesto%20a%20diferentes%20condiciones%20ambientales..)

- UNNE. Universidad Nacional del Nordeste. Obtenido el 15 de septiembre del 2020 en <http://www.biologia.edu.ar/plantas/corteza.htm>.
- UVIGO. Universidad de Vigo. Obtenido el 26 de octubre del 2020 en [https://mmegias.webs.uvigo.es/1-vegetal/guiada\\_v\\_meristemas.php](https://mmegias.webs.uvigo.es/1-vegetal/guiada_v_meristemas.php).
- WWF. World Wildlife Fund. Obtenido el 20 de octubre del 2020 en [http://awsassets.wwf.es/downloads/wwf\\_\\_\\_informe\\_incendios\\_forestaales\\_2019\\_ar\\_de\\_el\\_mediterraneo\\_2019.pdf](http://awsassets.wwf.es/downloads/wwf___informe_incendios_forestaales_2019_ar_de_el_mediterraneo_2019.pdf).
- WWF. World Wildlife Fund. Obtenido el 20 de octubre del 2020 en [https://wwfes.awsassets.panda.org/downloads/wwf\\_informe\\_incendios\\_2020\\_el\\_planeta\\_en\\_llamas.pdf?54921/Informe-incendios-forestales-2020-El-planeta-en-llamas](https://wwfes.awsassets.panda.org/downloads/wwf_informe_incendios_2020_el_planeta_en_llamas.pdf?54921/Informe-incendios-forestales-2020-El-planeta-en-llamas).