2025 | 16·20
GIJÓN | JUNIO
9º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

9CFE-1527

Actas del Noveno Congreso Forestal Español
Edita: **Sociedad Española de Ciencias Forestales. 2025**.
ISBN: **978-84-941695-7-1**

Organiza

Respuesta vegetativa y productiva del pino piñonero injertado en tres patrones del género *Pinus*

SANCHEZ-BRAGADO, R. (1), TEIXIDO, A. (1), RICHTER, K.(1), SEGARRA, M. (2), ALETÀ, N. (1)

(1) Programa de Gestión Forestal Multifuncional. Centro de Ciencia y Tecnología Forestal de Cataluña (CTFC), Solsona, 25280, Lleida, España.
(2) Áreas Naturales y Recursos Genéticos Forestales. Forestal Catalana SA. Generalitat de Cataluña.,

Resumen

Las masas de *P. pinea* (PP) se distribuyen en áreas edáfica y climatológicamente muy diversas. Sin embargo, su domesticación para la producción de piñón conlleva establecer esta especie en las mejores condiciones para su cultivo. La influencia del patrón en el comportamiento productivo de una especie frutal está ampliamente documentada. Partiendo de esta premisa se evalúa el comportamiento de un clon de *Pinus pinea* (PP) injertado sobre tres patrones: *Pinus pinea* (PP), *Pinus halepensis* (PH) y *Pinus nigra* (PN). Para ello, se realizaron observaciones sobre 12 individuos de cada combinación durante dos períodos vegetativos (2021-2022) en maceta y posteriormente en campo (2022-2024). Los resultados muestran que mientras PH tuvo una mayor carga reproductiva y consiguió un mejor aprovechamiento de los recursos hídricos en comparación con PN y PP, el crecimiento vegetativo de las púas fue superior en el injerto homoblástico, pero esto llevó a un retraso en la entrada en producción. Por ahora, desde un punto de vista productivo, *PH* se ha comportado como un patrón más eficiente con los recursos que ha tenido a su alcance. Estos primeros resultados han de permitir ir tomando decisiones sobre cómo mejorar la domesticación de *Pinus pinea* como especie productora de piñón.

Palabras clave

Injerto, *Pinus halepensis, Pinus nigra, Pinus pinea*, régimen hídrico

1. Introducción

*El*Pino piñonero, *Pinus pinea*, es un árbol asociado al paisaje de la cuenca mediterránea. En la Península Ibérica existe la mayor superficie de masas forestales de esta especie con más de 600.000 ha, distribuidas en dos tipos de formaciones habituales (Figura 1): bosques monoespecíficos y mixtos(PIQUÉ et al., 2015).

Figura 1. *Distribución de la especie en la Cuenca Mediterránea EUFORGEN.*

El pino piñonero es una especie de carácter multifuncional plenamente integrada en el paisaje mediterráneo y capaz de ofrecer, además de un fruto y una madera valiosos, una buena fijación del suelo, siendo por ello ampliamente utilizada en repoblaciones para contención de dunas. Tiene también un gran valor ecosistémico por su capacidad de micorrización con distintas especies de hongos y específicamente con varias productoras de trufas comerciales(MORCILLO et al., 2017; PIQUÉ et al., 2015). Además, su demostrada plasticidad adaptativa(SÁNCHEZ-GÓMEZ et al., 2009) la convierte en una alternativa a considerar para amplias regiones con climatología de tipo mediterráneo(LOEWE & DELARD, 2019). El piñón es un fruto seco muy apreciado por su valor nutricional, con un elevado contenido proteico y en ácidos grasos poliinsaturados (entre los más elevados de los frutos secos)(EVARISTO et al., 2013; NERGIZ & DÖNMEZ, 2004). Sin embargo, aun siendo el más valioso Producto Forestal No Maderable (PFNM) del bosque mediterráneo la producción todavía recae, casi exclusivamente, en las masas boscosas más o menos naturales. En la última década, estas masas forestales han estado sometidas a recurrentes sequías y a daños bióticos no controlados y en general adolecen de falta de gestión. En estas condiciones, no existe una estabilidad productiva, un defecto difícilmente aceptable en un fruto si quiere tener presencia en los mercados internacionales(MUTKE et al., 2013).

Para mejorar las perspectivas de la producción de piñón, se están dando los

primeros pasos hacia la domesticación de la especie, tratando de promoverla como una alternativa de cultivo para tierras agrícolas de secano en áreas de clima mediterráneo(MUTKE et al., 2013). Actualmente, el consumidor asocia el piñón de *P. pinea* a un producto natural y saludable que proviene de pinares 'naturales' poco gestionados. Su domesticación no debería perder de vista esta opinión, y dirigirse a desarrollar la mejora del cultivo bajo criterios agroforestales (GUADAÑO et al., 2026). Un primer paso importante se dio al seleccionar genotipos productivos de pino piñonero (MUTKE et al., 2017) y establecerlos en plantaciones por técnicas de injerto. El injerto en varias especies de pinos se ha utilizado ampliamente con fines ornamentales, o para montar huertos semilleros clonales dentro de programas de mejora genética forestal. En el *Pinus pinea,* el injertado se ha revelado muy beneficioso al reducir el tiempo en alcanzar la madurez productiva avanzando la entrada en producción de los 15 años en un brinzal hasta los tres años en los árboles injertados(CATALAN, 1990; GORDO et al., 2013; GUADAÑO et al., 2016). En el camino hacia la domesticación de la especie un siguiente paso es el de evaluar que puede aportar el uso de un determinado patrón en las nuevas plantaciones injertadas de *P. pinea*, esperando, que tal y como ocurre en frutales, la adecuación del patrón a las condiciones edáficas de la finca pueda suponer beneficios claros a la producción(GUADAÑO et al., 2016; GUÀRDIA et al., 2021). Así, injertar *P. pinea* sobre especies mediterráneas como *P. halepensis* y *P. nigra,* que en conjunto abarcan un área de 3.5 millones de hectáreas(KEELEY, 2001), podría ampliar las zonas cultivables de *P. pinea*.

Con el fin de evaluar las limitaciones en el uso de estos injertos heteroblásticos, el Centro de Ciencia y Tecnología Forestal de Cataluña (CTFC) y el Instituto de Investigación y Tecnología Agroalimentarias (IRTA) establecieron una red experimental en diferentes ubicaciones de Cataluña bajo condiciones ambientales divergentes. Diez años después, no se han observado efectos negativos alguno ni en el crecimiento de las plantas ni en la producción de piñones en los árboles injertados sobre *P. halepensis* (DE LA MATA et al., 2019; GUÀRDIA et al., 2021).

En el ensayo del que presentamos los resultados, se pretende valorar el comportamiento diferencial de los patrones elegidos desde su fase juvenil. Se consideraron tres opciones: la propia especie *P. pinea* bien adaptada a sequía, a altas humedades y temperaturas ambientales y a suelos silíceos con textura arenosa(CALAMA et al., 2019); el pino de Alepo o carrasco, *P. halepensis* que vegeta bien en suelos pesados y calcáreos de zonas semi-áridas y ecosistemas con escaso aporte hídrico(MAESTRE & CORTINA, 2004; MARTÍNEZ-FERNÁNDEZ et al., 2019; ROLDÁN et al., 1996); y la tercera el pino salgareño *P. nigra*, que se desarrolla en sustratos calizos con textura franco-arenosas bajo sequías moderadas contando con un cierto aporte hídrico(CALAMA et al., 2019), o en suelos ácidos como las pizarras (GENOVA & MATTINEZ-MORILLAS, 2022).

2. **Objetivos**

- Valorar el comportamiento vegetativo, fisiológico y productivo de *Pinus pinea* injertado sobre tres especies de pinos utilizados como patrones, *P. halepensis*, *P. nigra* y *P. pinea,* en su fase juvenil en contenedor.
- Estudiar la capacidad reproductiva de estos mismos árboles una vez plantados en campo.

3. **Metodología**

El ensayo se encuentra ubicado en Torre Marimon en Caldes de Montbui, Barcelona (41°37′58″ N, 2°10′03″ E, 203 msnm). Forman el diseño experimental un total de 54 pinos que fueron instalados en contenedores de 300 L en abril del 2019. Son tres las especies de *Pinus* que lo integran: *P. pinea*, *P. halepensis* y *P. nigra*. Para cada una de las especies se cuenta con 12 árboles injertados (P. pinea (PP), *P. halepensis* (PH) y *P. nigra* (PN), en que la especie actúa sólo como patrón, y 6 brinzales de cada uno de ellas sin injertar. Las plantas se cultivaron e injertaron, en su caso, en el vivero de la empresa pública Forestal Catalana entre 2016 y 2018. Todas las plantas fueron injertadas con el mismo material, un clon de *P. pinea*, no catalogado de la Región de procedencia Cataluña Litoral(ALÍA et al., 2009).

El diseño experimental se planificó en bloques completos al azar, con seis bloques y dos observaciones por especie en las plantas injertadas y una observación en los brinzales de la especie sin injertar. De esta forma, fueron en total 36 árboles injertados y 18 brinzales, instalados en maceta (300L) en 2019. El monitoreo se efectuó durante dos períodos vegetativos (2020-2021) en contenedor. En su traslado a campo (invierno 2022-23) se respetó el diseño experimental de las macetas. El seguimiento del ensayo se reemprendió en 2024 dejando 2023 como año de asentamiento de las plantas al terreno.
El seguimiento más exhaustivo se realizó sobre los 36 árboles injertados (Figura 2) y estos son los resultados que se exponen.

H	P+N	P+P	p	N	P+H	P+N	P+P	P+H	<	Riego alto
p	P+P	P+H	P+P	P+N	P+N	N	P+H	H	<	Riego medio
N	P+H	P+N	H	P+P	P+H	p	P+N	P+P	<	Riego bajo
P+H	P+H	H	P+P	P+N	N	p	P+N	P+P	<	Riego alto
P+N	p	P+N	P+P	P+H	P+P	P+H	H	N	<	Riego medio
P+P	N	P+P	P+N	H	P+H	P+H	p	P+N	<	Riego bajo

Figura 2. *Diseño experimental del ensayo en macetas. Los árboles señalados en rojo son los escogidos para realizar el seguimiento más exhaustivo.*

Un aspecto fundamental de este ensayo fue la gestión del riego, primero en las macetas, en las que se aportaron 40 litros por árbol una vez a la semana (riego alto); cada 2 semanas (riego medio); o cada 3 semanas (riego bajo) de mayo a septiembre durante 2021 y 2022. Esta cantidad se estableció como la necesaria para alcanzar la capacidad de campo del sustrato en cada riego. Todas las macetas se mantuvieron libres de vegetación adventicia durante todo el período. Después

del traslado a campo en noviembre de 2022 se decidió no diferenciar los aportes hídricos durante 2023, y se aplicó un riego de soporte cada semana para facilitar la recuperación de los árboles. En 2024 se reinició la diferenciación hídrica, en este caso suministrando un soporte hídrico solo en primavera (riego medio, aportación hídrica del 1 de abril al 31 de junio: 210 m^3/ha) y hasta principios de agosto (riego alto, aportación hídrica del 1 de abril al 15 de agosto: 510m^3/ha.) *vs.* tratamiento en secano (bajo) (Tabla 1). La cantidad de agua aportada se calculó haciendo un balance hídrico semanal considerando la evapotranspiración y la pluviometría, y asegurando que el agua alcanzaba la profundidad mínima de los 60 cm en el suelo, y utilizando el coeficiente K_c de FAO para coníferas. También se aplicaron, cuando se requirió, tratamientos fitosanitarios específicos para el control de *Leptoglossus occidentalis* (2.5% de Deltametrin (EW)).

Tabla 1. *Gestión del riego durante el estudio.*

Riego	2021 y 2022 (macetas)	2024 (campo)
1 abril al 15 agosto.	Aporte total periodo 510 m^3	/ha
Medio	1 abril al 31 junio.	Aporte total periodo 210 m^3 /ha

En 2021, 2022 i 2024 se realizó un seguimiento del crecimiento de laspúas semanalmente, desde inicios del crecimiento (principios de abril) hasta la estabilización del crecimiento anual (finales de junio) sobre todos los árboles injertados.También se hizo el de la fenología reproductiva contando el número de conos de primer, segundo y tercer año presentes en cada pie. A mediados de primavera se recogieron cuatroacículasadultas completamente desarrolladas del verticilo apical y cuatro del lateral (8acículasindividuales en total por cada árbol) y sobre ellas se tomaron medidas de densidad y distribución estomática. Para la visualización de las estomas (Figura 3) se aplicó una capa fina de esmalte de uñas transparente en la zona abaxial de lasacículas (la parte plana), que se dejó secar durante unos 90 segundos, y se arrancó con cinta adhesiva adhiriendo la muestra a un portaobjetos. Con un microscopio óptico se contó el número de estomas por campo con el objetivo de 20 aumentos (øcampo = 0.9 mm, S = 0.636mm^2). Este recuento se realizó para cada acícula recogida de los 36 árboles, teniendo así 4 campos por tipo de verticilo (apical/lateral). Se calculó la densidad estomática como el número de estomas por superficie de hoja (mm^2).

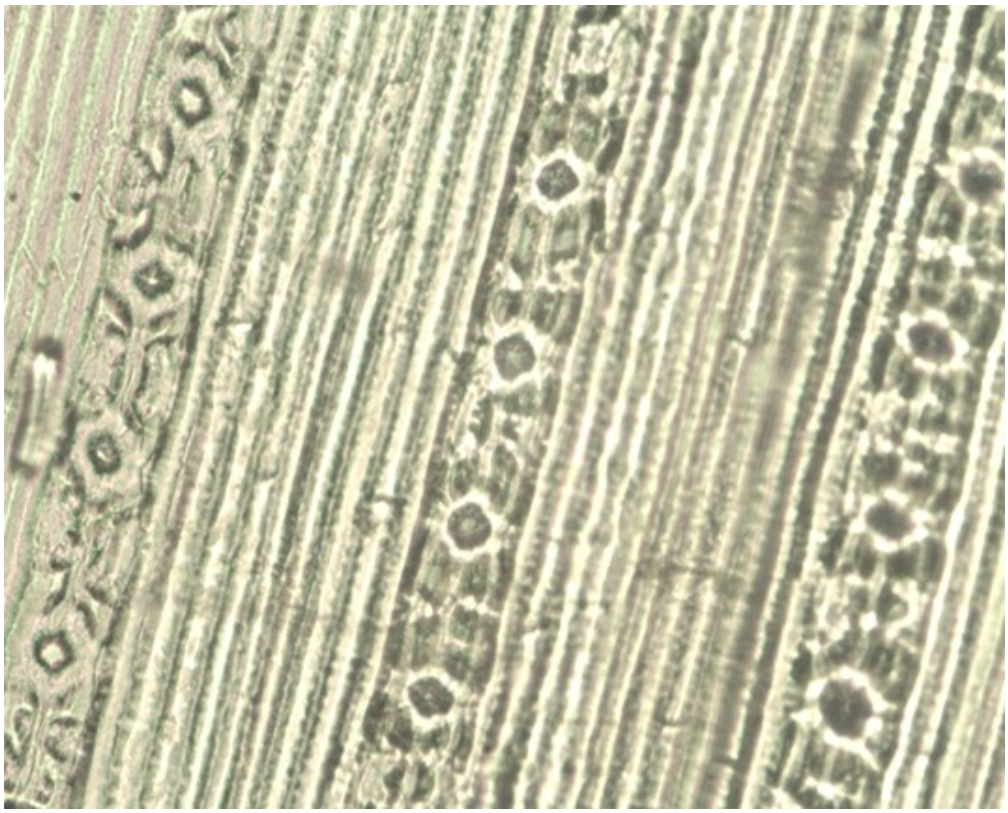

Figura 3. *Imagen a través de un microscopio óptico a 10 aumentos de la superficie de una de una acícula, de la especie P. pinea. Se observan estructuras celulares, células oclusivas como los estomas.*

La conductancia estomática de lasacículas (g_s)se midió con un porómetro (Decagon Devices, Inc., Pullman, Washingtons) en los 36 pinos injertados en 2021 y en 2022. Se realizó la medición de la $g_s$decada árbol en 4 acículas individuales totalmente desarrolladas de la cara más soleada, sin arrancarlas del árbol. Se hicieron dos mediciones por planta, una del verticilo apical y otra del lateral, y en dos días diferentes, durante todo el ciclo vegetativa semanalmente desde abril (periodo de floración) hasta septiembre (inicio de parada vegetativa).

Para el análisis de composición isotópica del carbono, se cosecharon las acículas de primer año, a inicios de septiembre (una vez completamente desarrolladas), en contenedor en 2022 y en campo en 2024, y se secaron dentro de sobres de papel en la estufa a 70ºC durante al menos 48h. Una vez las hojas secas y trituradas (con un molino o con un mortero) se pesaron las muestras (entre 0.7-0.9 mg) en cápsulas de estaño utilizando una micro-balanza de alta precisión. Las cápsulas se analizaron posteriormente con un espectrómetro de masas de relación isotópica acoplado a un analizador elemental (Delta C IRMS; ThermoFinnigan, Bremen, Alemania) en los Servicios Científicos y Técnicos de la Universidad de Barcelona. La composición isotópica del carbono ($\delta^{13}C$) se expresará en partes por mil ($^{o}/_{oo}$).

1. Resultados

La evolución del crecimiento vegetativo, según el tamaño de las púas, se muestra en la Figura 4. En 2021, el patrón de PH respondió con un mayor crecimiento de

púas en los aportes hídricos alto y bajo. En contenedor el crecimiento sobre PH y PN no se vio afectado por el aporte hídrico en ninguno de los dos años considerados, mientras que en PP un aporte medio de agua sí favoreció a las púas. En 2022 el patrón de PH mostró también un mayor crecimiento de púas en riego alto. Por el contrario, PP mostró un mayor crecimiento en condiciones de medio y bajo aporte hídrico en 2022. El paso a condiciones de campo aumentóel crecimiento de las púas siendo muy superior al logrado en contenedor en casi todas las combinaciones. El injerto homoblástico se vio netamente favorecido con el aporte hídrico alto y en cambio PN y PH crecieron más en secano (aporte bajo).

***Figura 4**. Crecimiento vegetativo desde el inicio al final de su crecimiento (finales junio) según nivel y aporte hídrico.*

En 2021, PH respondió con un mayor esfuerzo reproductivo (suma de los conos de distintas edades en el mismo pie) en los tres aportes hídricos estudiados, seguido de PP y PN (Figura 5). En 2022, de nuevo el patrón PH mostró un mayor esfuerzo reproductivo en alto y medio aporte hídrico, manteniendo además una proporción de conos de las tres edades similar. En 2024, en condiciones de campo, la tendencia fue la misma, siendo el patrón de PH, el que presentó mayor carga reproductiva en todos los aportes hídricos. Sin embargo, en 2024 la proporción de estróbilos fue muy superior a la de las piñas de 2º y 3er año en PH. Así PH, mostró una carga reproductiva constante a lo largo de los años (similar a 15 conos) en aporte hídrico alto y medio. El injerto homoblástico con PP, también presentó una buena respuesta de carga reproductiva en aporte hídrico alto y medio, aunque no tan alta como el patrón de PH (Figura 5) y PN se mantuvo siempre en un comportamiento

intermedio. Las condiciones de secano evaluadas sólo un año en campo, 2024, parecen ser más soportables para PH que para los otros dos patrones.

En las medidas de conductancia estomática se mostraron unos valores superiores en todas las combinaciones en las acículas de primer año en comparación con las acículas de segundo año (Figura 6). En 2021 bajo condiciones de aporte hídrico alto, las acículas de primer año mostraron una mayorg_s que en las de segundo año. Tales diferencias disminuyeron a medida que las condiciones de aporte hídrico también lo hicieron. En 2021 y 2022 tanto los injertos homoblásticos como heteroblásticos mostraron una conductancia similar entre ellos, tanto en acículas de primer como de segundo año.

La composición isotópica del carbono ($\delta^{13}C$) mostró para el patrón de PH, una tendencia a un mayor estatus hídrico en condiciones de alto y bajo aporte hídrico comparado con PP y PN en 2022 (Figura 7). A medida que las condiciones de disponibilidad de agua disminuyeron, en todos los casos la$\delta^{13}C$ fue más elevada (menos negativa). En 2024, dicha tendencia también se observó para el patrón de PP y PH. En cambio el patrón de PN mantuvo una composición isotópica similar en los distintos niveles de aporte hídrico.

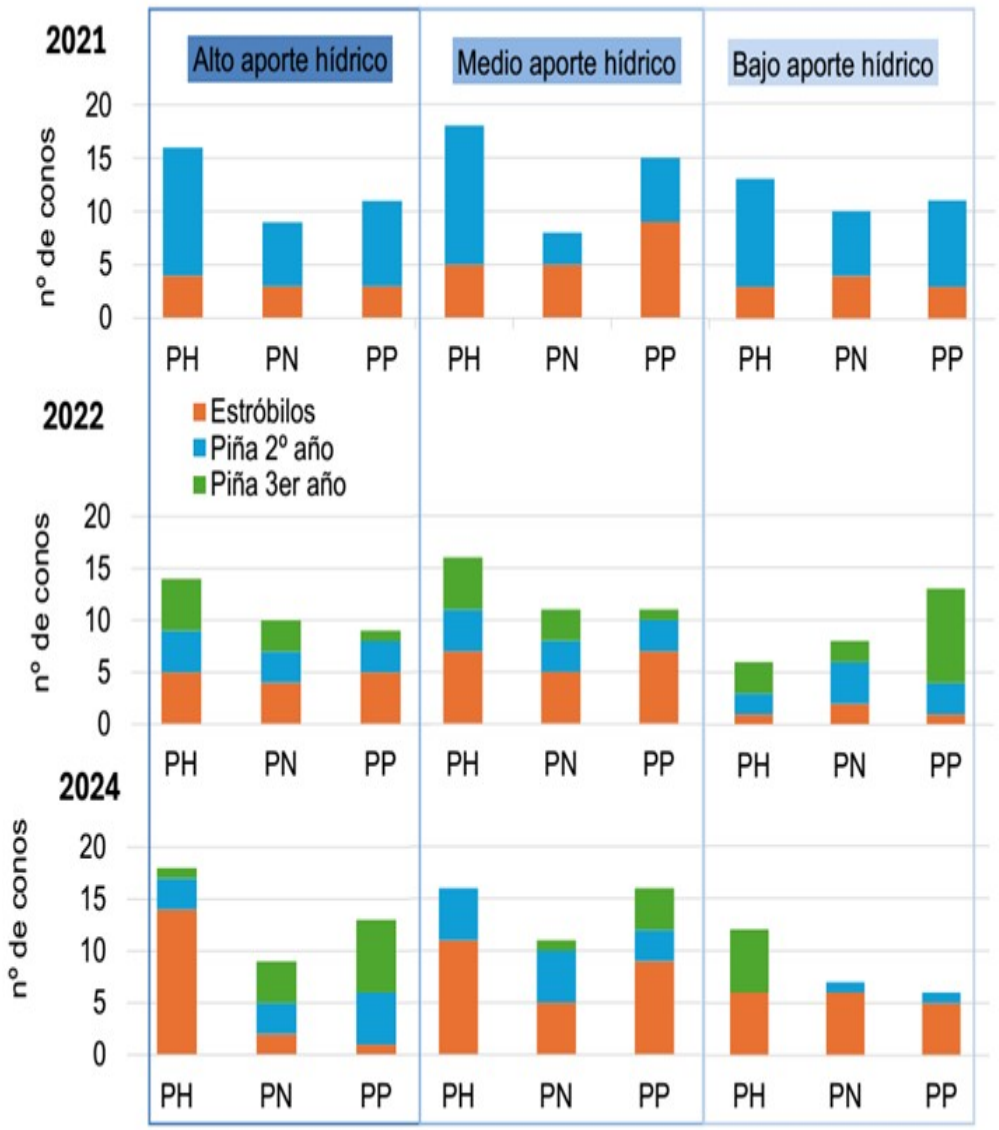

Figura 5. *Carga reproductiva en julio según el nivel de aporte hídrico.*

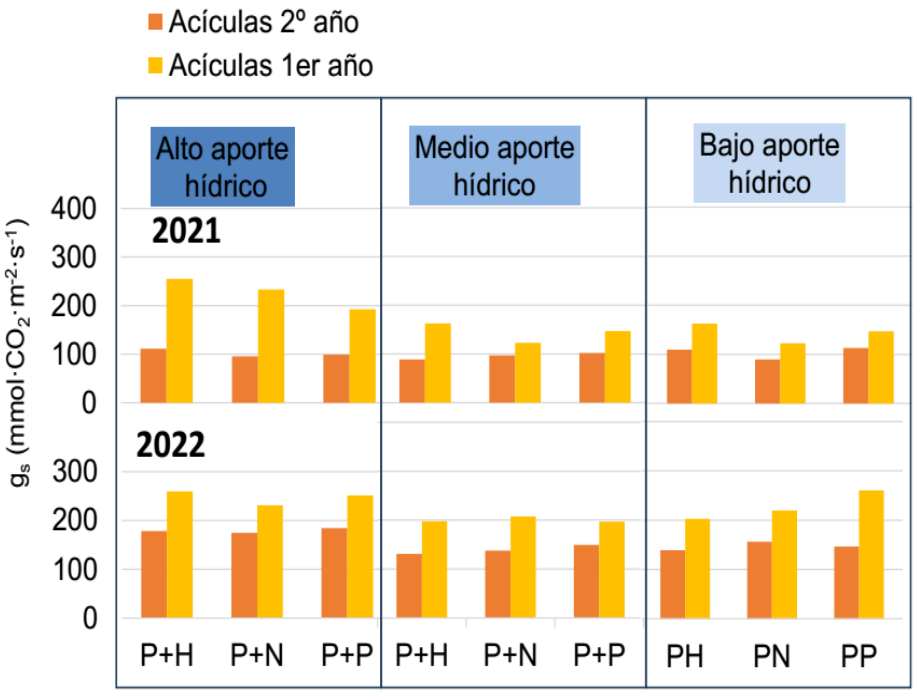

***Figura 6**. Conductancia estomática durante el crecimiento vegetativo de los árboles.*

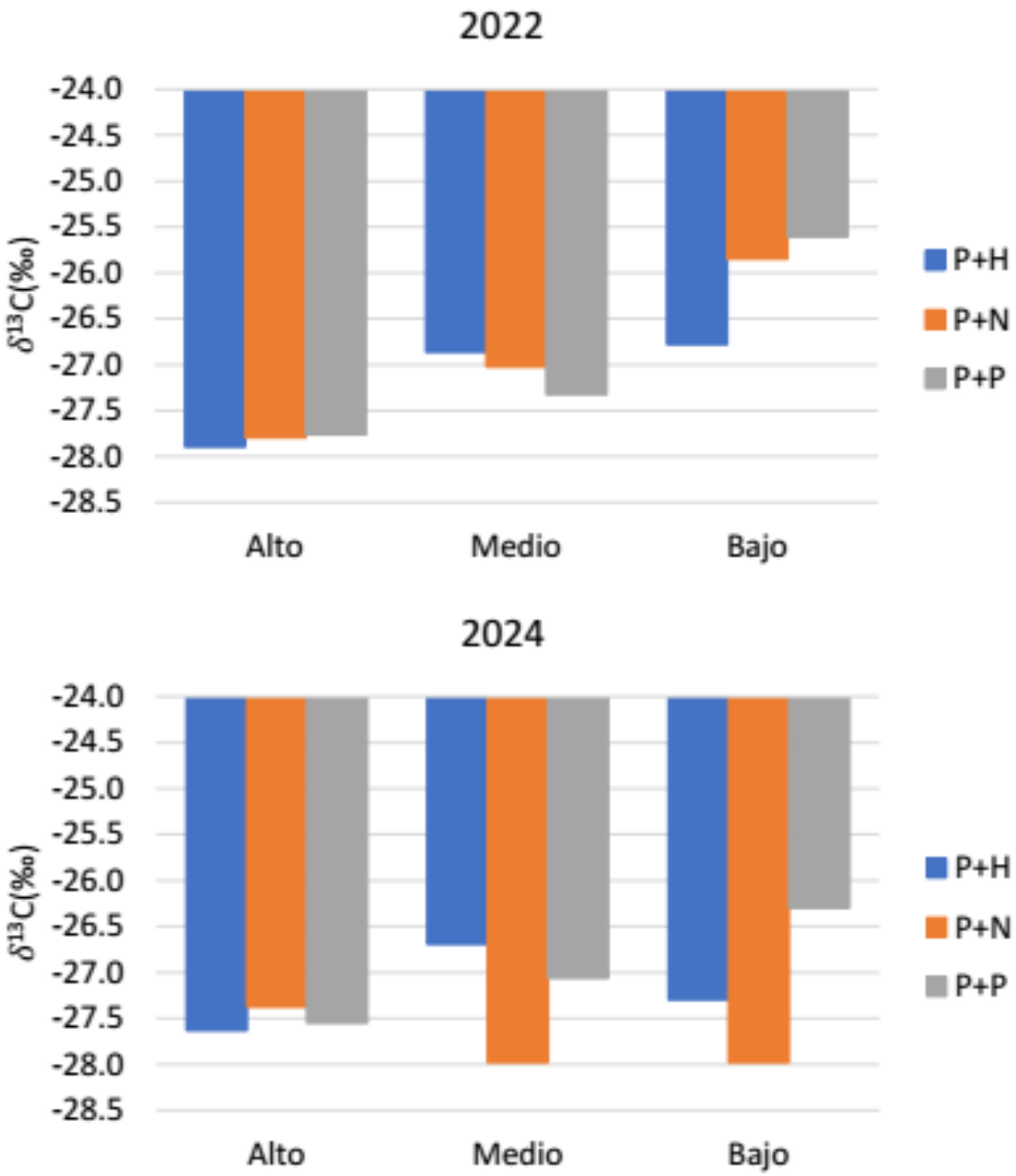

Figura 7. Composición isotópica del carbono medida en acículas de primer año durante el 2022 y 2024.

Por lo que respecta la densidad estomática fue mayor en todas las plantas injertadas sometidas a un aporte hídrico alto en 2021 (Tabla 2). En 2022, los resultados no fueron claros igualándose la respuesta al agua. En 2024, ya en campo, la densidad estomática fue superior en aporte hídrico medio. Con respecto a los diferentes patrones, no se observaron tendencias diferencias entre especies.

Tabla 2. *Densidad estomática de las acículas de segundo año.*

Densidad estomática (nºestomas/mm2)		
2021	2022	2024
Riego Alto		

81.7	63.9	77.4
84.2	67.3	72.8
81.9	63.7	71.8
Riego Medio		
76.3	61.7	84.3
74.4	68.5	80.7
74.1	68.1	76.0
Riego Bajo		
77.6	63.2	67.3
77.2	61.6	74.9
74.4	62.5	76.2

5. Discusión

El presente estudio se centra en aportar conocimiento al proceso de domesticación del pino piñonero como cultivo agroforestal, explorando su mejora mediante la selección de patrones adecuados para cada zona, en línea con prácticas comunes en especies frutales (ARAS et al., 2021). Actualmente, existen ensayos que evalúan la viabilidad y productividad de plantaciones injertadas como alternativa para mejorar el rendimiento en la producción de piñones, especialmente en regiones de clima mediterráneo semiárido, donde *P. halepensis* presenta mejor adaptación (PIQUÉ et al., 2017; GUÀRDIA et al., 2021). El enfoque de este trabajo resulta particularmente diferente, dado que en la última década la mayoría de los estudios se han centrado en mejorar resultados productivos a través de la gestión del cultivo (LOEWE & DELARD, 2012; FARINHA et al., 2018; LOEWE-MUÑOZ et al., 2019), sin buscar el porqué de estos cambios. El presente trabajo aborda la interacción entre patrón e injerto desde una perspectiva funcional y fisiológica.

En 2024, la densidad estomática de las acículas aumentó con un aporte hídrico medio y disminuyó con un aporte bajo. Este comportamiento concuerda con lo reportado por GRASSI & MAGNANI (2005) y ZHANG et al. (2006), quienes observaron que la densidad estomática puede incrementarse bajo estrés moderado y reducirse en situaciones de estrés hídrico severo. Los estomas actúan como reguladores clave del equilibrio hídrico y del intercambio gaseoso, ajustando su densidad y apertura según la disponibilidad de agua y la demanda atmosférica (HETHERINGTON & WOODWARD, 2003; BRODRIBB et al., 2007). Dado que entre el 95 y el 98 % del agua absorbida se pierde por transpiración, la eficiencia en el uso del agua resulta crítica para el éxito de las plantaciones en ambientes semiáridos. En los árboles injertados no se observaron efectos del patrón sobre la densidad ni la conductancia estomática, lo que sugiere que la regulación fisiológica del intercambio de agua está determinada por el injerto, en este caso *P. pinea*. Esto refuerza la idea de una dominancia funcional del injerto sobre el patrón, como también se ha descrito en otras especies leñosas (JONES et al., 2003; FLEXAS et al.,

2004). Sin embargo, el patrón sí mostró influencia sobre variables de desarrollo y fenología reproductiva: los injertos sobre *P. halepensis* presentaron mayor vigor y precocidad (GUÀRDIA et al., 2021), probablemente debido a la mejor adaptación de su sistema radicular a suelos pobres y condiciones de sequía (ALETA et al., 2017; MARTÍNEZ-BALLESTA et al., 2010). Esta diferenciación funcional entre injerto y patrón puede ser especialmente útil para el manejo adaptativo de plantaciones, permitiendo seleccionar portainjertos en función del tipo de estrés ambiental (por ejemplo, sequía o suelos pobres) sin comprometer las funciones fisiológicas esenciales del injerto, que en este caso es el productor de conos y piñones.

El análisis isotópico de $\delta^{13}C$ reveló diferencias entre patrones, aunque sin tendencias claras. No obstante, *P. halepensis* (PH) mostró una tendencia a mantener un mayor estatus hídrico, tanto en condiciones de alto como de bajo aporte durante 2022, en comparación con *P. pinea* (PP) y *P. nigra* (PN). Este resultado coincide con la literatura que asocia valores menos negativos de $\delta^{13}C$ con una mayor eficiencia en el uso del agua (WUE), y por tanto con una mejor capacidad de las plantas para mantener la asimilación de carbono en condiciones de sequía (FARQUHAR et al., 1989; CERNUSAK et al., 2013). Este comportamiento indica una posible resiliencia fisiológica de *P. halepensis* en situaciones desfavorables, lo que refuerza su idoneidad como patrón en zonas semiáridas o con alta variabilidad hídrica, como ya han sugerido otros estudios en contextos mediterráneos (BAQUEDANO & CASTILLO, 2007; AWADA et al., 2003). La capacidad de este patrón para sostener el intercambio gaseoso y mantener un estado hídrico más favorable en situaciones de estrés podría estar relacionada con su sistema radicular más agresivo y profundo, así como con un mayor control estomático ante déficits hídricos (BORGHETTI et al., 1998; TOGNETTI et al., 1997).

Asimismo, se observaron diferencias consistentes en la carga reproductiva entre patrones, siendo *P. halepensis* el que mostró mayor carga en todos los años evaluados, independientemente del nivel de aporte hídrico. Este hallazgo es relevante desde el punto de vista productivo, ya que sugiere que PH no solo mantiene un mejor estado hídrico, sino que también lo traduce en una mayor inversión reproductiva, incluso en condiciones de escasez. Esto podría estar asociado a una estrategia de supervivencia frente al estrés (ARONNE & DE MICCO, 2001). Este patrón parece aprovechar mejor los recursos disponibles, como también se evidenció en los ensayos en maceta y en campo en 2024, donde, con menor consumo hídrico, logró producir más que los patrones PP y PN.

No obstante, en 2024 el crecimiento de las púas en condiciones de campo fue netamente superior al logrado en contenedor, especialmente en el injerto homoblástico. Este resultado sugiere que el injerto homoblástico podría presentar un desarrollo más lento y entrar en fase reproductiva más tardía en comparación con el injerto heteroblástico sobre *P. halepensis*. Esta diferencia en precocidad puede atribuirse al hecho de que los árboles analizados aún se encuentran en su etapa juvenil, y a que el desarrollo vegetativo prolongado en especies leñosas suele estar asociado a la persistencia de características juveniles (GREENWOOD, 1995; HACKETT, 1985). El retraso observado en el injerto homoblástico también podría estar relacionado con la influencia del patrón sobre la tasa de desarrollo del injerto y sobre la arquitectura del sistema vascular, como se ha descrito en diversas especies frutales (ALBACETE et al., 2009; GOLDSCHMIDT, 2014). Por el contrario, la mayor precocidad reproductiva y el vigor vegetativo observados en los árboles injertados sobre *P. halepensis* podrían deberse a una mejor adaptación de su sistema radicular a suelos pobres y condiciones de sequía, lo que facilita una

exploración más eficiente del suelo y una mayor tolerancia al estrés hídrico (ALETA et al., 2017; MARTÍNEZ-BALLESTA et al., 2010). A pesar de estos resultados prometedores, es importante destacar que la estabilidad a largo plazo del injerto, así como los posibles efectos diferidos sobre la producción y fisiología de la especie, requieren un seguimiento continuado de varios años. Solo mediante una evaluación prolongada será posible caracterizar el comportamiento fisiológico integral del sistema injerto-patrón y validar su idoneidad para plantaciones productivas en entornos mediterráneos variables.

Este estudio aporta evidencia empírica relevante sobre el uso de injertos en *Pinus pinea* como estrategia de mejora agronómica en contextos mediterráneos, particularmente en zonas semiáridas. El objetivo principal fue evaluar las posibilidades de ampliar las zonas actuales de presencia natural de *P. pinea* hacia entornos edáficos más diversos, como suelos calizos y pesados donde prospera *P. halepensis*, o suelos alcalinos pero fértiles actualmente ocupados por *P. nigra*, cuya relevancia forestal está en declive (Plaza-Álvarez et al., 2020). Para ello, se diseñó un sistema de seguimiento continuo en los primeros años de desarrollo, dada la escasa información existente sobre el comportamiento 'frutal' de esta especie. Los resultados indicaron que, en variables fisiológicas relacionadas con el intercambio de H_2O, la respuesta de los árboles está principalmente determinada por la especie injertada (*P. pinea*) y no por el patrón. Sin embargo, en lo que respecta al esfuerzo reproductivo, el patrón de *P. halepensis* mostró una ventaja consistente en la mayoría de tratamientos hídricos. Aun así, estos resultados deben interpretarse con cautela, ya que es posible que el injerto homoblástico entre en producción más tarde que los injertos heteroblásticos, como sugiere el mayor crecimiento observado en campo durante 2024. En este sentido, es imprescindible continuar con las mediciones en fases más avanzadas del desarrollo del árbol para poder obtener resultados concluyentes sobre la idoneidad agronómica de cada patrón. Estos hallazgos refuerzan la importancia de considerar tanto la fisiología del injerto como la adaptabilidad del patrón al entorno edáfico e hídrico, abriendo nuevas perspectivas para la intensificación sostenible del cultivo de piñón mediterráneo en escenarios de cambio climático.

Conclusiones

En suma, el uso estratégico de patrones adaptados a condiciones edáficas y climáticas específicas se perfila como una herramienta para mejorar el rendimiento y la resiliencia del cultivo de *Pinus pinea*. La diferenciación funcional entre patrón e injerto ofrece oportunidades para un manejo más eficiente de las plantaciones en contextos limitantes. Estos hallazgos tienen implicaciones prácticas en el diseño de sistemas de producción de piñón: la elección del patrón puede modular aspectos estructurales y de crecimiento, mientras que el control fisiológico de la respuesta estomática y la eficiencia del uso del agua se mantiene bajo la regulación del injerto. En consecuencia, los sistemas injertados ofrecen una vía prometedora para intensificar la producción en condiciones marginales sin comprometer las respuestas funcionales esenciales de la copa. Este trabajo sienta las bases para futuros estudios a largo plazo que validen estas interacciones en fases adultas del cultivo, y aporta información valiosa para programas de mejora y diseño de modelos productivos más sostenibles. Todo ello contribuye al proceso de domesticación y consolidación del piñonero como especie agroforestal de alto

valor en la región mediterránea.

6. Agradecimientos

Especial agradecimiento a Francisco Perez por su inmejorable trabajo en la gestión de los campos. Este estudio se realizó bajo el marco de PROYECTOS DE I+D+i. MODALIDADES “GENERACIÓN DEL CONOCIMIENTO” Y “RETOS INVESTIGACIÓN” 2019 PID2019-107483GB-100.

7. Bibliografía

ALBACETE, A., GHANEM, M. E., MARTÍNEZ-ANDÚJAR, C., ACOSTA, M., SÁNCHEZ-BRAVO, J., ASINS, M. J., ...& PÉREZ-ALFOCEA, F. (2009). Hormonal changes in relation to biomass partitioning and shoot growth impairment in salinized tomato (*Solanum lycopersicum L.*) plants. *Journal of Experimental Botany*, **60**(15), 4365–4378. https://doi.org/10.1093/jxb/erp241

ALETÀ, N., PIQUÉ, M., & MUTKE, S. (2017).Grafted stone pine plantations for cone production: trials on *Pinus pinea* and *Pinus halepensis* rootstocks from Tunisia and Spain.*Options Méditerranéennes*, A, 122.

ALÍA, R., GARCÍA DEL BARRIO, J. M., IGLESIAS, S., MANCHA, J. A., DE MIGUEL, J., NOCOLÁS, J. L., PÉREZ, F. V, & SÁNCHEZ, D. (2009). *Regiones de Procedencia de Especies Forestales en España. Ed. Ministerio de medio Ambiente y medio Rural* (PARQUES NACIONALES). Ministerio de medio Ambiente y medio Rural.

ARAS, S., KELES, H., & BOZKURT, E. (2021).Physiological and histological responses of peach plants grafted onto different rootstocks under calcium deficiency conditions.*Scientia Horticulturae*,*281*, 109967.

ARONNE, G., DE MICCO, V. (2001).Early reproductive success in Mediterranean trees: The role of shoot age and water status. *Plant Biosystems*, **135**(3), 287–294.

AWADA, T., RADOGLOU, K., FOTELLI, M. N., & CONSTANTINIDOU, H. I. A. (2003). Ecophysiology of *Pinus brutia* and *Pinus pinea* in a Mediterranean ecosystem. *Ecological Research*, **18**, 555–566.

BAQUEDANO, F. J., & CASTILLO, F. J. (2007). Drought tolerance in *Pinus halepensis* and *Quercus ilex* in two different sites of southeast Spain: Effects on water relations and leaf structure. *Tree Physiology*, **27**(4), 629–637.

BORGHETTI, M., CINNIRELLA, S., MAGNANI, F., & SARACINO, A. (1998). Influence of intermittent drought on xylem vulnerability to embolism in *Pinus halepensis*. *Tree Physiology*, **18**, 689–695.

BRODRIBB, T. J., HOLBROOK, N. M., EDWARDS, E. J., & GUTIÉRREZ, M. V. (2007). Relations between stomatal closure, leaf turgor and xylem vulnerability in eight tropical dry forest trees.*Plant, Cell & Environment*, 26(3), 443–450.

CALAMA, R., CONDE, M., DE-DIOS-GARCÍA, J., MADRIGAL, G., VÁZQUEZ-PIQUÉ, J., GORDO, F. J., & PARDOS, M. (2019).Linking climate, annual growth and competition in a Mediterranean forest: Pinus pinea in the Spanish Northern Plateau. *Agricultural and Forest Meteorology*, *264*. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.10.017

CATALAN, G. (1990). Plantaciones de Pinus pinea en zonas calizas para produccion precoz de pinon.*Ecologia*.

CERNUSAK, L. A., UBIERNA, N., WINTER, K., HOLTUM, J. A. M., MARSHALL, J. D., & FARQUHAR, G. D. (2013). Environmental and physiological determinants of carbon

isotope discrimination in terrestrial plants.*New Phytologist*, **200**(4), 950–965.
DE LA MATA, R., TEIXIDÓ, A., ALETÀ, N., TORRELL, A., ROS, L., & SEGARRA, M. (2019). La producció de pinyons en plantacions empeltades. In *XXXIV Jornades Tècniques E. Garolera* (pp. 6–13). CFC.
EVARISTO, I., BATISTA, D., CORREIA, I., CORREIA, P., & COSTA, R. (2013).Chemical profiling of Portuguese Pinus pinea L. nuts and comparative analysis with Pinus koraiensis Sieb. and Zucc. commercial kernels.*Options Méditerranéennes. Séries A: Mediterranean Seminars*.

FARINHA, A. C. O., SILVA, J. E. P., CORREIA, A. C., SOUSA, E. M. R., ROQUES, A., & BRANCO, M. (2018).Is *Leptoglossus occidentalis* entirely responsible for the high damage observed on cones and seeds of Pinus pinea? Results from a fertirrigation trial in Portugal.*Forest Ecology and Management*,*429*, 198-206.
FARQUHAR, G. D., EHLERINGER, J. R., & HUBICK, K. T. (1989). Carbon isotope discrimination and photosynthesis. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, **40**, 503–537.
GENOVA, M., & MATTINEZ-MORILLAS, D. (2022).Estudio dendroecológico de Pinus nigra en Checa.*Ecologia*, *16*, 83–95.
GOLDSCHMIDT, E. E. (2014). Plant grafting: new mechanisms, evolutionary implications. *Frontiers in Plant Science*, **5**, 727.
GORDO, J., MUTKE, S., & GIL, L. (2013).La relevancia de la especie de patrón portainjerto para el desarrollo de la copa y la producción de piña del pino piñonero injertado.In *Proceedings of the 6o Congreso Forestal Español* (pp. 10–14).

GRASSI, G. & MAGNANI, F. (2005).Stomatal, mesophyll conductance and biochemical limitations to photosynthesis as affected by drought and leaf ontogeny in ash and oak trees,*Plant, Cell and Environment,*vol.28(pg.834-849).
GREENWOOD, M. S. (1995). Juvenility and maturation in conifers: current concepts.*Tree Physiology*, **15**(7-8), 433–438.
GUADAÑO, C., IGLESIAS, S., LEÓN, D., ARRIBAS, S., GORDO, J., GIL, L., MONETRO, G., & MUTKE, S. (2016). *Establecimiento de plantaciones clonales de Pinus pinea para la producción de piñón mediterráneo.*(INIA).
GUÀRDIA, M., TEIXIDÓ, A., SANCHEZ-BRAGADO, R., & ALETÀ, N. (2021).An agronomic approach to pine nut production by grafting stone pine on two rootstocks. *Agriculture (Switzerland)*, *11*(11).
https://doi.org/10.3390/agriculture11111034
HETHERINGTON, A. M., & WOODWARD, F. I. (2003). The role of stomata in sensing and driving environmental change. *Nature*, 424, 901–908.
KEELEY, J. (2001). Ecology, Biogeography and Management of Pinus Halepensis and P. Brutia Forest Ecosystems in the Mediterranean Basin. In G. Ne'eman & L. Trabaud (Eds.), *Biologia plantarum* (Vol. 12, Issue 4). Journal of Vegetation Science.
https://doi.org/10.1023/a:1002805627957
LOEWE, V., & DELARD, C. (2019). Stone pine (Pinus pinea L.): an interesting species for agroforestry in Chile. *Agroforestry Systems*, *93*(2).https://doi.org/10.1007/s10457-017-0166-6

LOEWE, V. & DELARD, C. (2012).*Un nuevo cultivo para Chile, el pino piñonero (Pinus pinea L.)*.Santiago de Chile: Instituto Forestal.
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). https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.05.040
MARTÍNEZ-BALLESTA, M. C., ALCARAZ-LÓPEZ, C., MURIES, B., MOTA-CADENAS, C., & CARVAJAL, M. (2010).Physiological aspects of rootstock–scion interactions.

Scientia Horticulturae, 127(2), 112–118.
MARTÍNEZ-FERNÁNDEZ, J., ALMENDRA-MARTÍN, L., DE LUIS, M., GONZÁLEZ-ZAMORA, A., & HERRERO-JIMÉNEZ, C. (2019).Tracking tree growth through satellite soil moisture monitoring: A case study of Pinus halepensis in Spain.*Remote Sensing of Environment*, *235*. https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111422
MORCILLO, M., DE PAZ, E., VILANOVA, X., & SÁNCHEZ, M. (2017). Viabilidad y rentabilidad de una plantación de pino piñonero (Pinus pinea) micorrizado con trufa bianchetto (Tuber borchii).*Montes*, *127*, 14–17.
MUTKE, S., PASTOR, A., & PICARDO, A. (2013). Toward a traceability of European pine nuts “from forest to fork.” *Options Méditerranéennes*, *105*.
Nergiz, C., & Dönmez, I. (2004). Chemical composition and nutritive value of Pinus pinea L. seeds. *Food Chemistry*. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2003.09.009
PIQUÉ, M., BELTRÁN, M., VERICAT, P., CALAMA, R., & CERVERA, T. (2015).*Models de gestió per a les pinedes de pi pinyer (Pinus pinea L.):producció de fusta i pinya i prevenció d’incendis forestals* (Centre de la Propietat Forestal, Ed.).Departament d’Agricultura, Ramaderia, Pesca, Alimentació i Medi Natural. Generalitat de Catalunya.https://cpf.gencat.cat/ca/detalls/Article/0016_Models-gestio-pi-pinyer
PIQUÉ M., COELLO J., AMMARI Y., ALÈTA N., SGHAIER T., MUTKE S. (2017).Grafted stone pine plantations for cone production: trials on Pinus pinea and Pinus halepensis rootstocks from Tunisia and Spain.Options Méditerranéennes, A, 122.

PLAZA-ÁLVAREZ, P. A., LUCAS-BORJA, M. E., SAGRA, J., MOYA, D., FONTÚRBEL, T., & DE LAS HERAS, J. (2017).Soil respiration changes after prescribed fires in Spanish black pine (Pinus nigra Arn. ssp. salzmannii) monospecific and mixed forest stands.Forests,8(7), 248.
ROLDÁN, A., QUEREJETA, I., ALBALADEJO, J., & CASTILLO, V. (1996).Survival and growth of Pinus halepensis Miller seedlings in a semi-arid environment after forest soil transfer, terracing and organic amendments.*Annales Des Sciences Forestieres*, *53*(6). https://doi.org/10.1051/forest:19960605
SÁNCHEZ-GÓMEZ, D., CANO, F. J., CERVERA, M. T., & ARANDA, I. (2009).Variabilidad fenotípica en respuesta al estrés hídrico en una especie forestal genéticamente homogénea: Pinus pinea L. *5o Congreso Forestal Español*.

TOGNETTI, R., MICHELOZZI, M., & BORGHETTI, M. (1997). Seasonal variations in the water relations of *Quercus pubescens* trees subjected to different environmental conditions. *Tree Physiology*, **17**, 121–130.

ZHANG, Y.P., WANG, Z.M.,WU, Y.C. &ZHANG, X. (2006).Stomatal characteristics of different green organs in wheat under different irrigation regimes, *Acta Agronomica Sinica*,vol. 32(70-75)