

## **Evaluación del estado de estrés en especies planifolias introducidas bajo cubierta de pinar de repoblación**



Máster Universitario en Restauración de Ecosistemas

**Autor:** Víctor Javier Martínez Fernández

**Director y tutor académico:** Dr. Juan A. Oliet Palá

**Codirector:** José Luis García Pérez

En Madrid, a 28 de octubre de 2019

## Resumen:

Actualmente España cuenta con grandes extensiones de masas monoespecíficas de pinar de repoblación. Estas masas presentan espesuras muy elevadas debido a la falta de rentabilidad en su gestión. Sin embargo, la sucesión ecológica natural de estas masas se encuentra estancada, lo cual las hace vulnerables frente a posibles perturbaciones propiciadas por el actual cambio climático.

Para este estudio, se realizaron claras de diferentes tipos y pesos sobre una masa pura de repoblación de *Pinus pinaster* situada en la provincia de Guadalajara, con el fin de determinar el efecto de un gradiente de cobertura del dosel sobre cuatro especies introducidas. Las especies seleccionadas fueron: 1) *Quercus ilex*, 2) *Quercus pyrenaica*, 3) *Acer monspessulanum* y 4) *Sorbus torminalis*.

Se realizaron cuatro tratamientos distintos con tres réplicas por tratamiento: a) Control, b) clara baja de peso fuerte (35% en área basimétrica), c) clara baja de peso moderado (20% en área basimétrica), y d) clara por lo alto de peso fuerte (35% en área basimétrica) con selección de árboles de porvenir. Con el fin de evaluar el estrés al que se encontraban sometidas las especies plantadas en el sotobosque, se tomaron datos de variables microambientales y fisiológicas en cada parcela experimental.

Los resultados demostraron que la aplicación de cualquier tratamiento reducía eficazmente el estrés de las plantas introducidas en comparación con las parcelas control, especialmente durante los períodos de sequía. En concreto, fue el tratamiento CB-20% el más eficaz en la retención de humedad del suelo y en la disminución del estrés. Conforme aumentaba el peso de la clara, los efectos positivos disminuían debido al aumento de la insolación.

Estos resultados demuestran los efectos positivos del manejo de este tipo de masas artificiales sobre el ambiente del sotobosque, pudiéndose reactivar la sucesión ecológica natural, asegurando el futuro de la masa en el largo plazo.

**Palabras clave:** monoespecífico, clara, cambio climático, dosel, fisiológico, sotobosque.

## **Abstract:**

Spain currently has large extensions of monospecific masses of reforestation pine. These masses have very high thicknesses due to the lack of profitability in their management. The natural ecological succession of these masses is blocked, which makes them vulnerable to possible disturbances propitiated by the current climate change.

For this study, thinning of different types and weights were made on a pure repopulation mass of *Pinus pinaster* located in the province of Guadalajara, in order to determine the effect of a canopy coverage gradient on four introduced species. The selected species were: 1) *Quercus ilex*, 2) *Quercus pyrenaica*, 3) *Acer monspessulanum* and 4) *Sorbus torminalis*.

Four different treatments were carried out with three replicates per treatment: a) Control, b) clear low of middleweight, c) clear low of weak weight, and d) clear high of strong weight with selection of future trees. In order to assess the stress to which the species planted in the undergrowth were subjected, data from microenvironmental and physiological variables were taken in each experimental plot.

The results showed that the application of any treatment effectively reduced the stress of introduced plants compared to control plots, especially during periods of drought. Specifically, the CB-20% treatment was the most effective in retaining soil moisture and reducing stress. As the weight of the treatment white increased, the positive effects decreased due to increased heat stroke.

These results demonstrate the positive effects of the management of this type of artificial masses on the undergrowth environment, being able to reactivate the natural ecological succession, ensuring the future of the mass in the long term.

**Keywords:** monospecific, clear, climate change, canopy, physiological, undergrowth.

## Índice:

<b>1</b>	<b>Introducción.....</b>	<b>5</b>
<b>1.1</b>	<b>Importancia de la restauración forestal.....</b>	<b>5</b>
<b>1.2</b>	<b>Contextualización del proyecto.....</b>	<b>7</b>
<b>1.3</b>	<b>Antecedentes.....</b>	<b>8</b>
<b>2</b>	<b>Objetivos.....</b>	<b>12</b>
<b>3</b>	<b>Material y métodos.....</b>	<b>12</b>
	<b>3.1 Localización del área de estudio.....</b>	<b>12</b>
	<b>3.2 Caracterización de la zona de estudio.....</b>	<b>14</b>
	<b>3.3 Tratamientos y diseño experimental.....</b>	<b>16</b>
	<b>3.4 Características de las plantas seleccionadas.....</b>	<b>19</b>
	<b>3.5 Establecimiento de las plantas.....</b>	<b>20</b>
	<b>3.6 Variables evaluadas.....</b>	<b>20</b>
	<b>3.6.1 Variables microambientales.....</b>	<b>20</b>
	<b>3.6.1.2 Precipitación.....</b>	<b>21</b>
	<b>3.6.1.3 Humedad del suelo.....</b>	<b>21</b>
	<b>3.6.2 Variables fisiológicas .....</b>	<b>22</b>
	<b>3.6.2.1 Fluorescencia de la clorofila.....</b>	<b>23</b>
	<b>3.6.2.2 Potencial Hídrico.....</b>	<b>24</b>
<b>4</b>	<b>Análisis estadísticos.....</b>	<b>25</b>
<b>5</b>	<b>Resultados.....</b>	<b>26</b>
	<b>5.1 Variables microambientales.....</b>	<b>26</b>
	<b>5.1.1 Precipitación.....</b>	<b>26</b>
	<b>5.1.2 Humedad del suelo.....</b>	<b>27</b>

5.1.2.1	Humedad del suelo de 0-20cm de profundidad....	27
5.1.2.2	Humedad del suelo de 30-40cm de profundidad..	28
5.1.2.2.1	Interacción Fecha*tratamiento.....	28
5.2	Fluorescencia de la clorofila (FvFm).....	30
5.2.1	Interacción especie*Tratamiento.....	30
5.2.2	Interacción Tiempo*Tratamiento.....	31
5.3	Potencial Hídrico.....	33
5.3.1	Interacción Especie*Tratamiento.....	33
5.3.2	Interacción Tiempo*Tratamiento.....	34
5.3.3	Interacción Tiempo*Especie.....	35
6	Discusión.....	37
6.1	Precipitación.....	37
6.2	Humedad del suelo.....	37
6.3	Fluorescencia de la clorofila.....	38
6.4	Potencial hídrico.....	40
7	Conclusiones.....	41
8	Agradecimientos.....	42
9	Bibliografía.....	43
10	Anexos.....	48

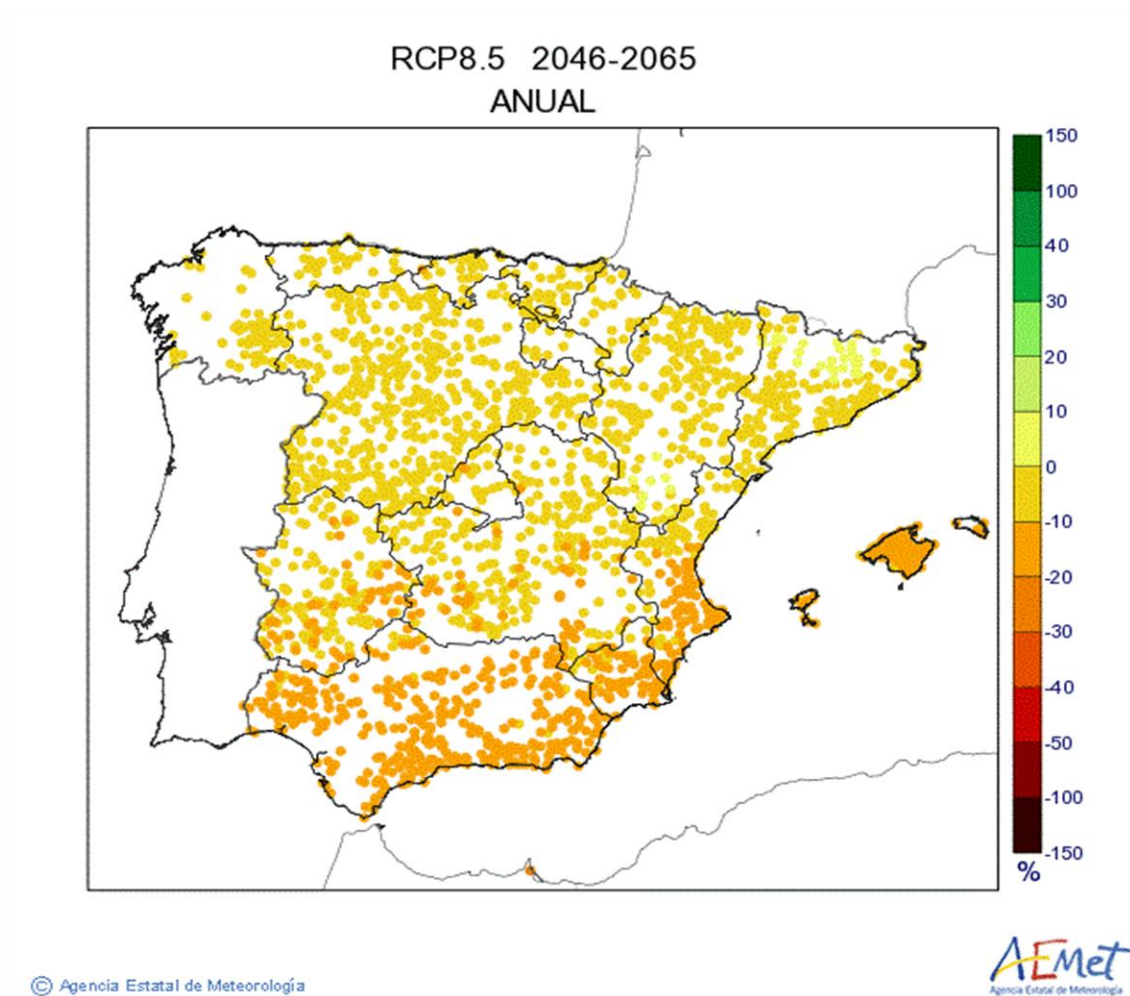
## **1. Introducción:**

### **1.1 Importancia de la restauración forestal:**

En un marco de cambio climático a nivel global, con una proyección de futuro de incremento de eventos climáticos extremos, es esencial que los bosques existentes, tanto los naturales como los artificiales, presenten una elevada resiliencia para poder adaptarse a las nuevas condiciones y puedan subsistir a largo plazo (Mola et al., 2018). En concreto, en las regiones mediterráneas, las predicciones advierten de un aumento en las temperaturas del aire y menos precipitaciones en los veranos, lo que se traduce en una disminución del agua disponible para los ecosistemas (IPCC, 2012). Además del estrés hídrico para la vegetación, también tendrán que superar barreras críticas tales como el incremento del riesgo de grandes incendios forestales o plagas, que pueden afectar a la composición y estructura de las comunidades vegetales, teniendo importantes consecuencias en todos los ecosistemas (Pausas y Paula, 2012).

A modo de ejemplo, en la **Figura 1** elaborada por la Agencia Estatal de Meteorología a partir de datos del IPCC, se observa un descenso de entre el 0-10% de las precipitaciones anuales para los años 2046-2065 en un escenario de aumento de emisiones.

En este contexto, para que los ecosistemas sean capaces de adaptarse al cambio climático, es preciso anticiparse a los efectos adversos del mismo, empleando recursos y esfuerzo en ejercer las medidas adecuadas con el fin de mitigar todo lo posible el impacto que puedan tener sobre los sistemas naturales y, en último término, sobre el ser humano (IPCC, 2012). Para ello, en el ámbito de la restauración ecológica, se deben llevar a cabo trabajos de adaptación con el fin de conservar los bosques remanentes, favorecer las masas mixtas frente a las monoespecíficas, fomentar la transición hacia bosques maduros, incrementar la diversidad genética de las especies, diversificar los distintos tipos de hábitats a escala de paisaje e incrementar la multifuncionalidad de los montes (Mola et al., 2018).

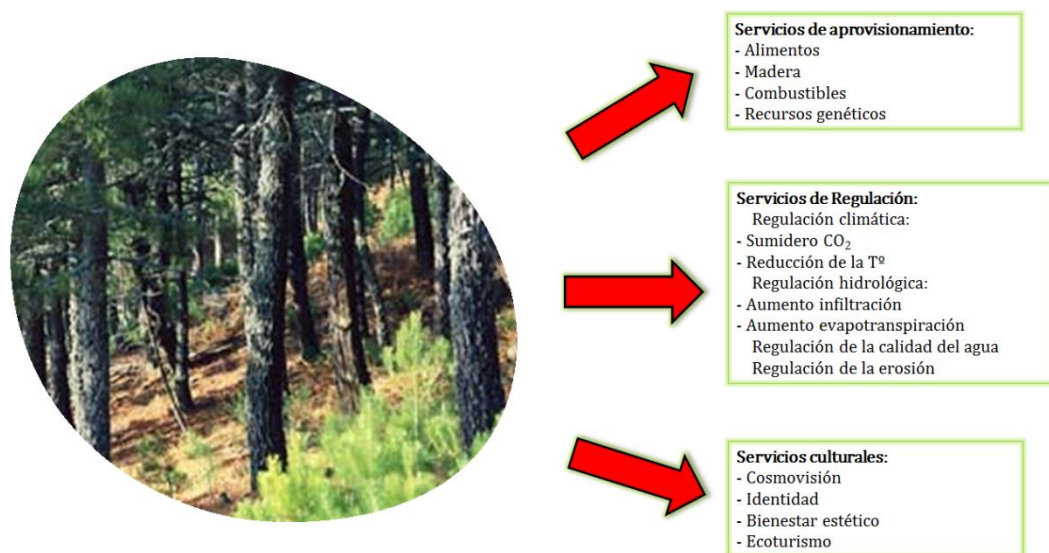


**Figura 1:** Predicción del % de precipitaciones anuales para los años 2046-2065 en un escenario de aumento de emisiones en las denominadas Sendas Representativas de Concentración (RCP). Estas son identificadas por su forzamiento radiativo total para el año 2100, que varía desde 2,6 a 8,5 W/m<sup>2</sup> Fuente: extraído de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) disponible en <http://www.aemet.es>.

Por otro lado, los bosques ofrecen una gran variedad de servicios ecosistémicos (véase **figura 2**), tanto de regulación (regulación del ciclo hidrológico, temperatura) como de abastecimiento (obtención de materias primas, alimento) y culturales (contemplación, turismo), que son imprescindibles para el bienestar de la población.

Según la evaluación de Ecosistemas del Milenio 4, en los últimos 50 años, el ser humano ha transformado los ecosistemas más rápida y extensamente que en ningún otro período de su historia, principalmente con el fin de satisfacer las demandas crecientes de recursos como alimento, agua dulce, madera, fibra y

combustibles. En cuanto a los servicios ecosistémicos, en los últimos 50 años, se ha degradado el 60% a nivel mundial. En el caso de España, el 45% de los servicios de los ecosistemas se han degradado o están siendo usados de forma insostenible, siendo los de regulación los más perjudicados (Reid et al., 2005).



**Figura 2:** Servicios ecosistémicos de un bosque. Fuente: modificado de Balbanera, (2012).

En este contexto, la restauración forestal puede ser una herramienta eficaz para disminuir la vulnerabilidad de los ecosistemas mediante el uso de prácticas de gestión adaptativa, que favorezcan la diversificación estructural y específica de las masas boscosas artificiales. Además, la conservación de los núcleos de dispersión remanentes naturales, puede favorecer la resiliencia y la resistencia de los bosques frente a condiciones abióticas adversas. Por otro lado, este tipo de actuaciones puede contribuir a la recuperación y sostenimiento de servicios ecosistémicos y con ello la funcionalidad de los ecosistemas, en beneficio de usuarios de generaciones futuras.

## **1.2 Contextualización del trabajo:**

Este trabajo se encuadra dentro del contexto del proyecto denominado (FORADMIT), “Gestión forestal para la adaptación y mitigación: diversificación



estructural y específica de pinares mediterráneos de repoblación” (AGL2016-77863-R), concretamente dentro del objetivo: caracterizar la respuesta postrasplante de especies introducidas bajo cubierta y de caracteres funcionales contrastados al gradiente ambiental en el sotobosque creado por las claras.

En el presente estudio, se pretende evaluar el estado de estrés que presentan cuatro especies planifolias instaladas bajo la cobertura de *Pinus pinaster* (pino resinero) en distintos ambientes del bosque, donde se han realizado tratamientos de mejora consistentes en claras de diversos pesos. Se pretende evaluar bajo qué tipo de tratamiento las especies establecidas en el sotobosque presentan un menor estrés y, por lo tanto, bajo que tipo de tratamiento predominan las interacciones de facilitación sobre las de competencia. En concreto, este estudio aborda las mediciones del segundo año desde la implantación de este proyecto, los datos pertenecientes al primer año fueron recogidos en otro estudio.

### **1.3 Antecedentes:**

En la actualidad, España cuenta con una superficie total de 50.595.505 ha, siendo el 55% de esta considerada como superficie forestal (30 millones aproximadamente). Dentro de esta superficie forestal, el 66% sería superficie arbolada (20 millones aproximadamente) y el 34% de la misma sería no arbolada según la definición de la actual Ley de Montes (INE, 2017). No obstante, esta condición ha sido producto del deterioro histórico de los ecosistemas naturales por causas antropogénicas, así como de actuaciones realizadas en beneficio de la recuperación de la cubierta forestal, como las que se describen a continuación.

Entre 1950 y 1970 mediante la ejecución del Plan General de Repoblación Forestal de España (PGRFE) se plantaron grandes extensiones de tierras con diversas especies arbóreas, cuyo propósito principal era la protección hidrológica frente a la erosión.

Con anterioridad a la Guerra civil española, los trabajos de forestación se basaban principalmente en reducir la pérdida de suelo ya que, debido a un uso tradicional insostenible de las zonas arboladas, los montes se encontraban desprovistos de vegetación, dándose grandes tasas de erosión que generaban

situaciones alarmantes, tales como la colmatación de embalses de abastecimiento o la desaparición de terreno cultivable (Machado et al., 2011).

A partir de 1939, tras el fin de la guerra, desde el gobierno se implementó un programa de forestación a gran escala, continuando con la iniciativa ya estudiada por el gobierno de la II República española. Dicho plan terminó a mediados de los años ochenta y muchas de estas repoblaciones se han conservado hasta la actualidad (Villar-Salvador, 2016).

La mayoría de las actuaciones del PGRFE tuvieron un remarcable éxito, teniendo en cuenta sus objetivos de proveer de una cubierta vegetal permanente a medio plazo que contrarrestara la erosión hídrica. Sin embargo, actualmente presentan una elevada densidad, ya que, debido a su baja rentabilidad, la gestión selvícola de mejora de la masa ha sido escasa, lo que ha propiciado repoblaciones monoespecíficas con baja diversidad estructural y elevada espesura (Madrigal, 1998). Estas características de la masa provocan condiciones microambientales estresantes bajo el dosel arbóreo, lo cual limita el desarrollo tanto de especies introducidas, como el reclutamiento de nuevas plántulas en el sotobosque (Pausas et al., 2004). Además, la falta de gestión selvícola hace a este tipo de masas más vulnerables frente a impactos causados por el cambio climático, tales como incendios, plagas, enfermedades y retardo de la regeneración natural entre otros (Serrada et al., 2011).

Diversos estudios han comprobado que cuando se realizan tratamientos selvícolas de mejora en rodales de repoblación con alta densidad, la competencia por recursos se reduce y predominan las interacciones de facilitación (Villar-Salvador, 2016). Estos procesos, pueden fomentar el crecimiento de otras especies vegetales leñosas rebrotadoras de sucesiones medias o tardías en estos ecosistemas artificiales, lo que se traduce en una mejora de la resiliencia y resistencia de estas plantaciones monoespecíficas, naturalizando a largo plazo la masa remanente y otorgando más oportunidades para la existencia a largo plazo de estos ecosistemas con las nuevas condiciones ambientales que vendrán derivadas de los procesos de cambio climático (Granados et al., 2016).

En la actualidad, las repoblaciones de pinares en España, aproximadamente 4,5 millones de ha, pueden presentar una ocasión de restauración forestal con el fin de generar bosques mixtos más resistentes potenciando el papel como facilitador de estos pinares (Serrada et al. 2011). Sin embargo, para que sea posible este tipo de restauración, se deben reducir las densidades de los rodales y de ser necesario, introducir plantas forestales para instaurar una fuente semillera y posibles núcleos de dispersión (Villar-Salvador, 2016).

Una vez establecidas, estas especies pueden actuar como núcleos de dispersión y reactivar los procesos naturales de sucesión ecológica mediante una restauración pasiva. Implementar este tipo de restauración es económicamente viable en entornos tan extensos donde la restauración activa tiene considerables dificultades, tanto técnicas como económicas. No obstante, en climas mediterráneos este tipo de restauración es muy lenta (Valladares, 2008). En este contexto, y dada la imposibilidad de retornar al ecosistema histórico de referencia, hablaríamos de procesos de rehabilitación (SER, 2004).

Algunas especies de frondosas son especialmente de interés para este tipo de proyectos de restauración, puesto que presentan elevada capacidad rebrotadora. Esta característica, puede disminuir el tiempo para la recuperación tras impactos ambientales adversos, al disminuir por ejemplo, la vulnerabilidad frente a una creciente incidencia de incendios forestales (Puerta-Piñero et al. 2012). Por este motivo, se eligen especies con estas características funcionales para su uso en la restauración de este tipo de sistemas artificiales, ya que de forma natural está impedido o se dificulta el establecimiento y la diseminación de estas especies por medios naturales (SER, 2004).

El establecimiento de nuevas plántulas está influenciado en gran medida por las condiciones de la cubierta de pino y por el grado de tolerancia de cada especie a la escasez de recursos como el agua (Fernández et al. 2016), por lo que los tratamientos de mejora sobre las cubiertas de pino pueden afectar de forma directa al reclutamiento de especies en el sotobosque. Por ejemplo, Lu et al. (2018) comprobaron que la supervivencia y el crecimiento de dos especies de plántulas que habían sido plantadas bajo cubiertas, se beneficiaron de las cortas de baja intensidad, observando respuestas individuales de cada especie a este factor según su tolerancia a la sombra.

Además del agua y los nutrientes, la luz es un recurso necesario para el desarrollo de las plantas. Se ha demostrado que condiciones de sombra intensa inducida por una elevada densidad del dosel, puede agravar el estrés proveniente de la sequía, ya que las plantas sombreadas emplearán más recursos al desarrollo del brote y al crecimiento del área foliar que al desarrollo de la raíz, lo que puede disminuir su eficacia al captar agua del suelo (Aranda et al., 2001; Gómez-Aparicio et al., 2006). Por otro lado, Tang et al. (2015) obtuvo como resultado de su estudio un nivel óptimo de irradiación de luz para el crecimiento de plántulas de *Tectona grandis* con valores de sombra cercanos al 75%, lo que indica que, modificando las condiciones del dosel en masas muy densas de pino, puede incrementarse el papel facilitador de las mismas sobre especies de sombra. En el hábitat de sotobosque, la luz es un recurso crítico limitado, que tiene influencia en el ciclo de vida, crecimiento y reproducción de las plantas típicas de este ambiente (Chen, 2003). Con la aplicación de claras con diferentes pesos, pueden inducirse cambios en la cantidad y la calidad de la luz que llega al sotobosque, así como cambios en su distribución temporal y espacial, lo que afecta directamente a la temperatura y humedad del aire, influyendo además sobre el contenido hídrico del suelo. En su trabajo, Mazza et al. (2011) demostraron que un adelgazamiento en rodales mediterráneos costeros de *Pinus pinea* reducía la pérdida de agua por intercepción, aumentando la cantidad de agua disponible bajo la cubierta de pino, lo que puede suponer una ventaja para otras especies presentes en el sotobosque de este tipo de climas, donde generalmente el agua es un recurso limitante. De este modo, a pesar del aumento de la temperatura, estos tratamientos pueden aumentar la cantidad de humedad del suelo por la reducción de interacciones de competencia (Gavinet et al., 2015).

Por estos motivos, el presente estudio puede aportar información útil sobre los factores que influyen en el establecimiento de especies de plantas de etapas de sucesión medias o tardías, ayudando a identificar los procesos que impiden la recuperación del ecosistema y establecer posibles actuaciones que propicien la regeneración natural de estos ecosistemas degradados. Por otro lado, la ejecución de este tipo de proyectos puede servir de referente para la restauración forestal de masas boscosas artificiales con dificultades inducidas por su falta de

manejo. De este modo, puede realizarse un acercamiento a dinámicas de actuación abordables económicamente para la renaturalización de estas masas artificiales de repoblación, haciendo posible su adaptación y persistencia en el tiempo.

## **2 Objetivos e hipótesis:**

Evaluar la respuesta fisiológica de cuatro especies planifolias con caracteres funcionales contrastantes ante un gradiente de cobertura tras la aplicación de tratamientos selvícolas en pinares de repoblación.

Objetivos específicos:

1. Determinar qué especies son más aptas ante distintos ambientes en el sotobosque de parcelas tratadas con claras de diferentes pesos.
2. Desentrañar las interacciones entre especie y ambiente sobre las respuestas fisiológicas de las plantas introducidas.
3. Evaluar el efecto de las claras sobre el microambiente bajo el dosel que favorezca el establecimiento de las plantas.

Hipótesis:

- La aplicación de claras de distinto tipo y peso genera diferencias microambientales en el sotobosque.
- Se observarán diferencias significativas en el desarrollo de cada especie en función del ambiente generado en el sotobosque como consecuencia de los tratamientos selvícolas.
- Existen interacciones entre especie y microambiente generado por el dosel con distinta cobertura, en las respuestas fisiológicas de las plantas introducidas.

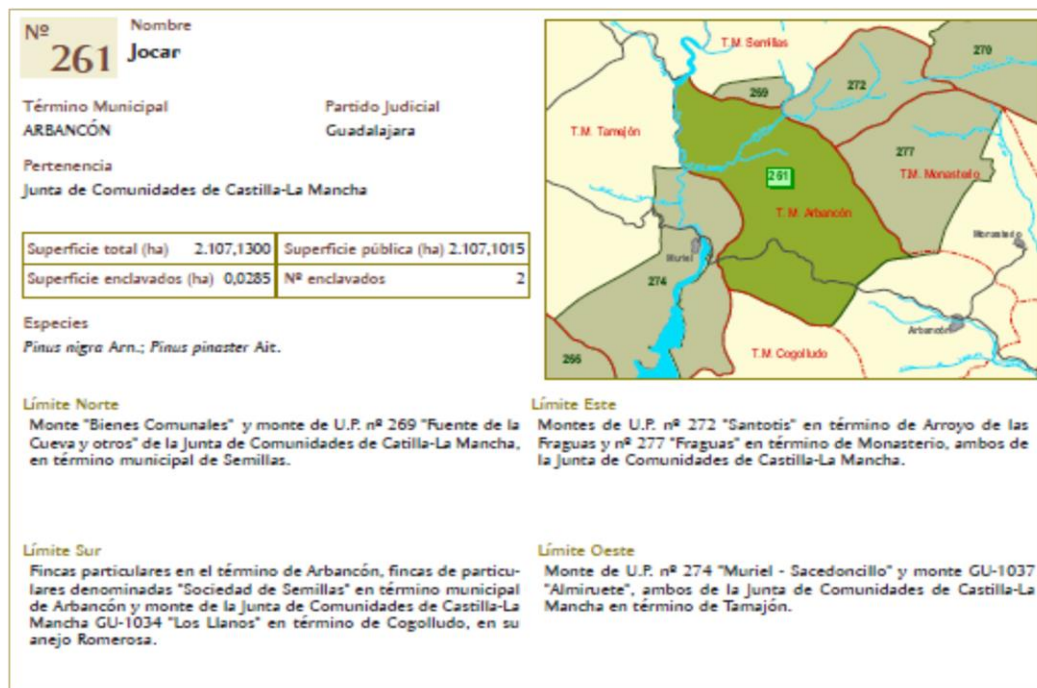
## **3 Materiales y métodos:**

### **3.1 Localización del área de estudio:**

La zona de estudio se encuentra dentro del monte de utilidad pública nº 261 de Júcar (2107 ha), dentro del término municipal de Albancón, en la provincia de Guadalajara (España) perteneciente a la Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha (**figuras 3 y 4**). Es un monte repoblado con *Pinus pinaster* (plantados en los años 60-70) por el Patrimonio Forestal del Estado a través del Plan General de Repoblación Forestal de España (PGRFE) con el fin de proteger de la erosión el vaso del embalse de Beleña.



**Figura 3:** Localización del municipio de Albancón dentro de la provincia de Guadalajara. Fuente: elaborado a partir de imágenes de Google ®.

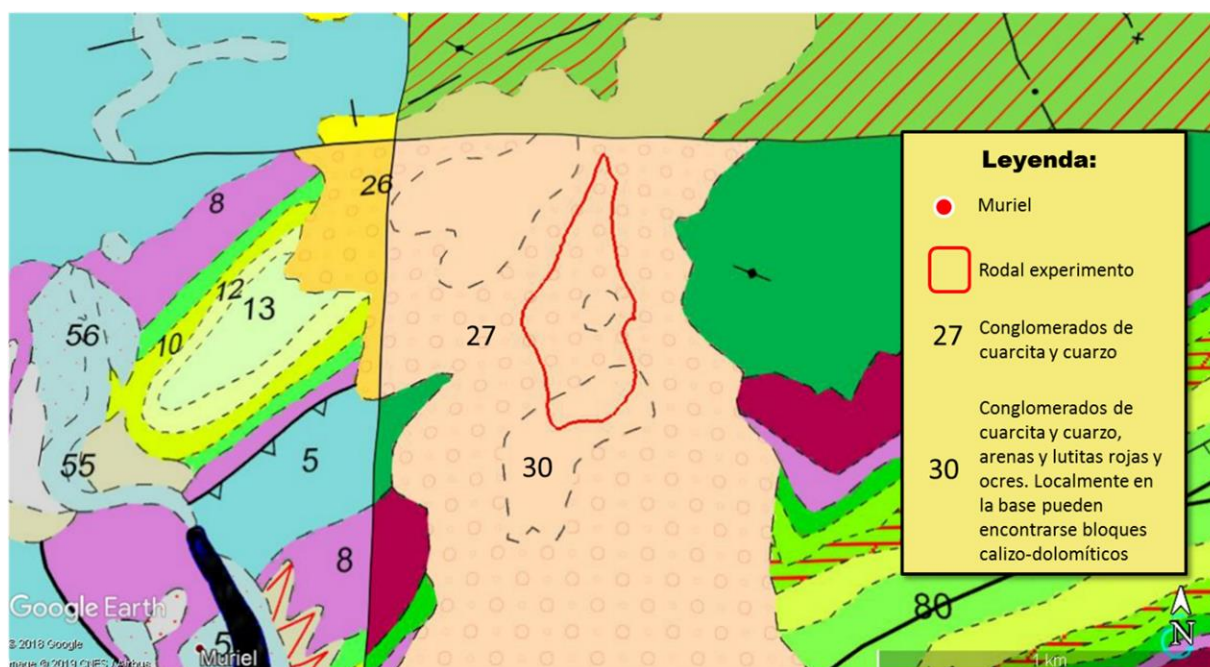


**Figura 4.** Ficha nº 261 (Júcar) de M.U.P de Guadalajara. Fuente: catálogo de Montes de Utilidad Pública de la provincia de Guadalajara.

### 3.2 Caracterización de la zona de estudio:

Dentro de la zona de estudio, existen tres unidades geológicas diferentes, que son: Conglomerados de cuarcitas y cuarzos, Pizarra negras homogéneas y Raña (IGME, 2019). En concreto, el rodal donde se ha implantado el dispositivo experimental se encuentra dentro de la hoja 486 (Jadraque) de la cartografía geológica del IGME (**Fig. 5**), asentándose este dispositivo sobre 2 unidades geológicas del terciario, que son:

- Conglomerados de cuarcita y cuarzo
- Conglomerados de cuarcita y cuarzo, arenas y lutitas rojas y ocre. Localmente también pueden encontrarse bloques calizo-dolomíticos.



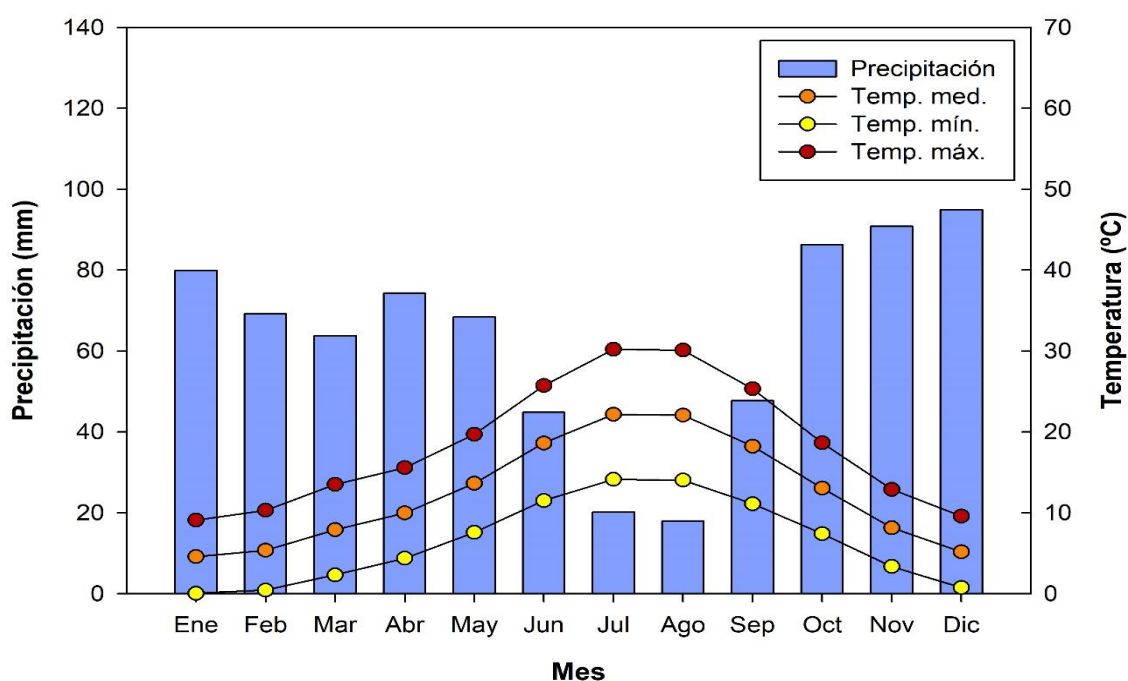
**Figura 5.** Figura de las unidades geológicas sobre las que se asienta el proyecto. Fuente: elaborado a partir de cartografía geológica del IGME (hoja 486 Jadraque).

En cuanto a los suelos que encontramos en este entorno, según el mapa de suelos de España del Instituto Geológico Nacional (IGN, 2009) son cambisoles húmicos. Este tipo de suelos se caracteriza por presentar un horizonte superficial (A) úmbrico o móllico. Estos horizontes superficiales poseen elevados niveles de materia orgánica, debido en este caso a la acumulación y descomposición de las acículas de la cubierta de *Pinus pinaster*. En general, estos suelos presentan

una buena diferenciación de sus horizontes y permiten un amplio rango de usos agrícolas potenciales. Sus limitaciones vienen dadas principalmente por la topografía, bajo espesor, pedregosidad o un bajo contenido en bases. En zonas donde la pendiente es elevada, su uso queda restringido al forestal o pascícola (IUSS, 2015).

Esta zona se encuentra a una altitud media de 1.070 metros, y presenta pendientes moderadas en alguna de las parcelas de estudio. Predominan las orientaciones de umbría, pero hay zonas de solana en alguna de las parcelas experimentales, lo que puede aportar un mayor abanico de resultados en función de la orientación y el tipo de tratamiento aplicado.

En cuanto al clima, la zona presenta inviernos fríos y relativamente húmedos, con un periodo estival muy seco. Tomando los valores de la estación climática más cercana, situada en la Presa del Vado (10 kilómetros de distancia aproximadamente) situada a 980 msnm, observamos para el periodo 1961-2003 una temperatura media anual de 12,4 °C y una precipitación de 640 mm al año (Fig.6).



**Figura 6.** Climodiagrama de la zona de actuación de la serie de datos 1961-2018. Fuente: elaboración propia a partir de datos obtenidos de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET).



La hidrología de la zona se encuadra dentro de la demarcación hidrográfica del Tajo, vertiendo en concreto al río Sorbe, el cual alimenta el embalse de Beleña. La protección de dicho embalse fue una de las justificaciones de la repoblación que se orquestó en la zona de estudio.

En cuanto a la comunidad vegetal existente en la zona, encontramos una masa predominante de *Pinus pinaster Ait. ssp. mesogensis*, situada en un terreno acaballonado con desfonde, debido a las pendientes de la zona. Además, se observan reminiscencias de las siguientes especies en el sotobosque (de Frutos, 2017):

-*Quercus ilex ssp. Ballota*, *Quercus faginea* y *Quercus pyrenaica* crecidos bajo el dosel arbóreo o en pequeños claros.

-*Cistus ladanifer L.*, con gran abundancia en la zona de estudio, en claros de la masa o en calles de desembosque generalmente. En menor medida encontramos *Cistus laurifolius L.*

-*Rosmarinus officinalis L.*, con una existencia representativa.

-*Juniperus communis* y *Juniperus thurifera*, presencia marginal en la zona.

-*Daphne gnidium*

-*Lavandula pedunculata*

-*Crataegus monogyna*

-*Erica arborea*

-*Rosa sp.*

-*Rubus sp.*

### **3.3 Tratamientos y diseño experimental:**

Para la realización de este estudio se aplicaron distintos tipos de claras sobre el dosel para evaluar cómo influyen sobre las condiciones microclimáticas del sotobosque y como se desarrollan distintas especies bajo diversos tratamientos. Como se muestra en la **tabla 1**, se realizaron cuatro tratamientos de claras con 3 réplicas por tratamiento (12 parcelas en total):

a) Control (sin claras), b) clara baja de peso fuerte (corta de 35% en área basimétrica), c) clara baja de peso moderado (20 % en área basimétrica), y d) clara por lo alto de peso fuerte (35 % en área basimétrica) con selección de árboles de porvenir (100 pies/ha).

Los distintos tratamientos fueron aplicados en rodales con una densidad media de 538 pies por hectárea y con 38m<sup>2</sup>/ha de área basimétrica. Se observaron evidencias de un tratamiento inicial anterior sobre la masa.

Variable	Tratamientos de clareo			
	Control	CB-20	CB-35	SL-35
Densidad (pies/ha)	537,4 ± 1,8	361,8 ± 9,0	332,6 ± 8.5	344,2 ± 21,3
Área basimétrica (m <sup>2</sup> /ha)	35,73 ± 1,4	28,7 ± 1,6	24,9 ± 1,0	23,2 ± 1,1

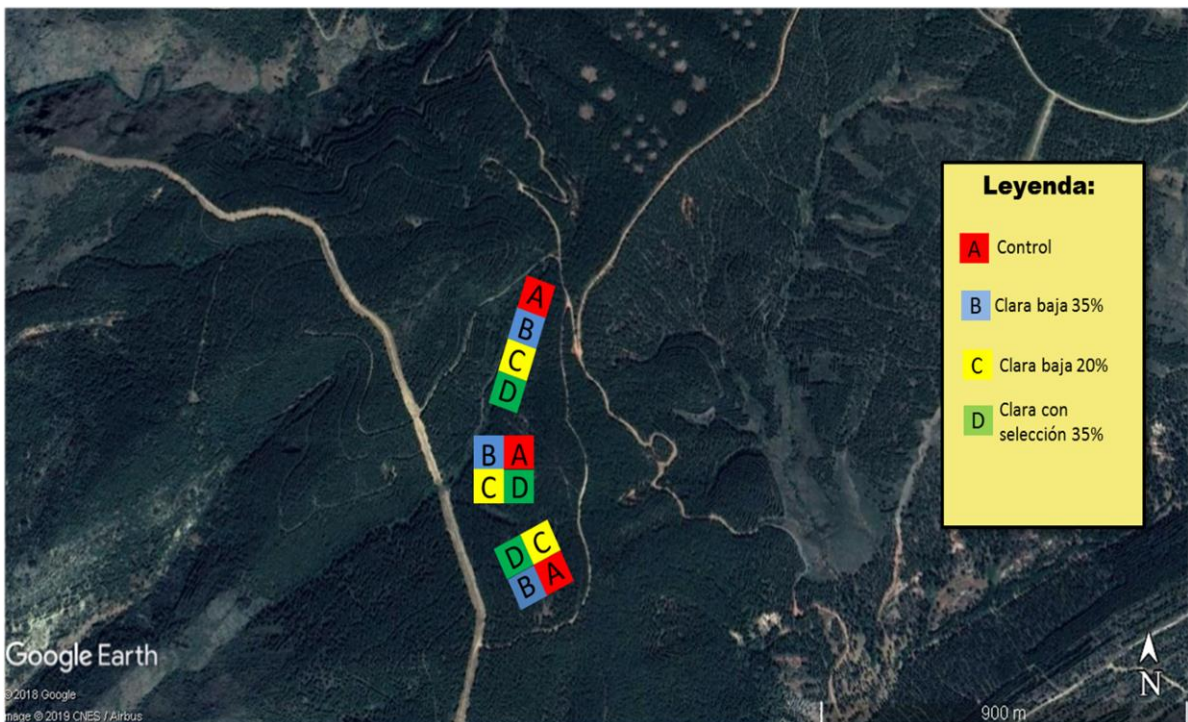
**Tabla 1.** Valores medios ± error estándar de densidad del arbolado y área basimétrica registrados tras la aplicación de los tratamientos de mejora aplicados sobre pinar de *Pinus pinaster* en la provincia de Guadalajara. Abreviaturas: CB-20= Clara baja débil – 20% de área basimétrica, CB-35=Clara baja fuerte -35 área basimétrica y SL= Clara selectiva – 35 % área basimétrica. Fuente: extraído de Rodrigo-García (2019).

Estos tratamientos se llevaron a cabo de noviembre a febrero de 2017 en parcelas de 70 x 70 metros, dejando una franja protectora de 10 m, obteniendo parcelas con una superficie útil de 50 x 50 m. Se estableció un mecanismo aleatorio para la asignación de tratamientos en cada parcela experimental. Las parcelas se situaron en zonas con condiciones edáficas y climáticas lo más homogéneas posibles, con el fin de observar variaciones provocadas únicamente por las condiciones inducidas según los distintos tratamientos aplicados (**Figuras 7 y 8**).

En cada parcela, se plantaron especies tardías en la sucesión con distintos atributos funcionales previamente cultivadas en vivero. Las especies seleccionadas para la plantación fueron: *Quercus ilex*, *Quercus pyrenaica*, *Acer monspessulanum* y *Sorbus torminalis*. Estas especies fueron protegidas con tubos protectores, con el fin de evitar en medida de lo posible la variación de resultados por herbivoría.



**Figura 7.** Localización zona de estudio. Fuente: elaborado a partir de mapas extraídos de Google Earth ®.



**Figura 8.** Disposición de las parcelas en la zona de estudio. A) control, B Clara baja del 35%, C) clara baja del 20%, D) clara por lo alto de peso fuerte (35%) con selección de árboles de porvenir. Fuente: Elaborado a partir de mapas extraídos de Google Earth®.

### 3.4 Características de las plantas seleccionadas:

Como se ha mencionado anteriormente, se seleccionaron cuatro especies de planifolias con carácter rebrotador típicas de regiones mediterráneas de distribución natural dentro de la zona de estudio o sus inmediaciones. Dichas especies fueron: 1) *Quercus ilex*, 2) *Quercus pyrenaica*, 3) *Acer monspessulanum* y 4) *Sorbus torminalis*.

La procedencia del germoplasma de encina y serbal fue de la zona de la Alcarria, mientras que la semilla del rebollo y del arce provenía de la sierra de Guadalajara-Aiyón.

La producción de planta se realizó en el vivero forestal de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes, Forestal y del Medio Natural perteneciente a la Universidad Politécnica de Madrid, situada a una altitud de 657 msnm. Para las quercíneas (encina y rebollo) se usó un contenedor de 400 cm<sup>3</sup> de volumen. Para *Sorbus torminalis* y *Acer monspessulanum* se usaron contenedores de 300 cm<sup>3</sup>. El sustrato se componía de un 75% de turba rubia KEKILA® OPM 420 Natural, un 25% de vermiculita y 7 g/l de de Nutricote® 18-6-8 (NPK). Una vez germinadas todas las plántulas, eran sometidas a condiciones de invernadero hasta inicios de verano, cuando se sacaban al exterior con condiciones de sombra hasta el otoño del mismo año.

Antes de realizar la plantación, se llevó a cabo una caracterización morfológica de las plántulas con el fin de conocer sus principales atributos en cuanto a calidad de planta (**tabla 2**), además de un muestreo de 10 plantas por especie destructivo, con el fin de observar las relaciones de dichas variables siguiendo los criterios propuestos por Hasse (2008).

Especie	Altura	Diámetro	PSA	PSR	IE	RPAR	ICD
<i>Acer monspessulanum</i>	10,9 ± 0,6	4,6 ± 0,2	0,9 ± 0,1	2,6 ± 0,2	2,3 ± 0,1	0,9 ± 0,1	1,8 ± 0,1
<i>Sorbus torminalis</i>	38,9 ± 5,0	5,9 ± 0,3	4,9 ± 0,8	4,8 ± 0,6	6,3 ± 0,4	1,5 ± 0,1	2,5 ± 0,2
<i>Quercus ilex</i>	22,56 ± 2,0	5,2 ± 0,3	1,5 ± 0,1	7,8 ± 0,9	4,3 ± 0,5	4,9 ± 0,8	2,5 ± 0,4
<i>Quercus pyrenaica</i>	60,4 ± 2,1	6,9 ± 0,2	4,7 ± 0,3	4,4 ± 0,4	8,9 ± 0,6	4,7 ± 0,3	2,2 ± 0,1

**Tabla 2.** Características morfológicas relativas a calidad de planta utilizada en las especies seleccionadas al momento de la plantación, donde PSA= Peso seco aéreo, PSR= Peso seco radical, IE= Índice de esbeltez, RPAR= Relación parte aérea/parte radical e ICD= Índice de Calidad de Dickson. Fuente: elaboración propia.

### **3.5 Establecimiento de las plantas:**

Las especies seleccionadas fueron plantadas en marzo del año 2018. Antes de la plantación, se preparó el terreno realizando hoyos con una profundidad de 70 cm con una moto-hoyadora manual de barrena helicoidal dadas las dificultades del terreno. Los hoyos se realizaron en líneas de plantación con una separación de 1,5 metros entre cada uno. La longitud de las líneas de plantación se estableció en consonancia con la longitud disponible del caballón. Cuando una línea de plantación estaba próxima a una calle de desembosque, se estableció un margen de tres metros de amortiguación para evitar su influencia en los resultados obtenidos por efectos de borde.

La plantación se realizó manualmente utilizando una azada. Las plantas se distribuyeron en grupos de cuatro en cada línea de plantación, estableciendo de manera aleatoria el orden de las especies en cada grupo. Se plantaron 15 plantas por especie en cada parcela, colocando protectores traslúcidos en cada individuo con fines de protección frente a herbívora. Dichas plantas fueron etiquetadas mediante chapas de aluminio usando un código tipo: Bx-Px-Ex, siendo B=bloque, P=parcela y E= especie.

Una vez finalizada la plantación, tuvo lugar un episodio de predación sobre las especies plantadas, por lo que se realizó un inventario de supervivencia obteniendo los siguientes resultados: *Quercus pyrenaica* 27%, *Quercus ilex* 42%, *Sorbus torminalis* 58% y *Acer monspessulanum* 96%. De forma complementaria se instalaron protectores más rígidos de fabricación manual en las plantas supervivientes.

### **3.6 Variables evaluadas.**

#### **3.6.1 Variables microambientales**

Para caracterizar las condiciones microambientales durante el periodo de estudio se midieron la precipitación y la humedad del suelo bajo el dosel de cada parcela. Adicionalmente se midió la temperatura y la humedad relativa de aire.

### 3.6.1.2 Precipitación:

Se realizaron mediciones de precipitación acumulada (mm) cada 15 días aproximadamente (julio 2018-octubre 2019) utilizando pluviómetros tipo “Helmann” y una probeta graduada con el fin de reducir el error en la toma de datos. En cada parcela se instalaron tres pluviómetros en guías verticales a una altura mínima de 1 metro del suelo. Adicionalmente, se tomaban medidas de 3 pluviómetros situados fuera de cubierta (cortafuegos) con el fin de obtener datos comparativos de precipitación acumulada fuera del dosel, pudiendo aproximar el grado de intercepción de la cubierta de pino (**Fig. 9**).



**Figura 9:** fotografía de pluviómetro tipo “Helmann” instalado bajo cubierta (izquierda) y cortafuegos cercano a las parcelas experimentales donde se instalaron los pluviómetros fuera de cubierta (derecha). Fuente: fotografías realizadas durante los trabajos de campo.

### 3.6.1.3 Humedad del suelo:

Se realizaron mediciones puntuales cada 15 días (julio-septiembre) del contenido volumétrico de humedad (%) en cada parcela experimental a una profundidad de 0-20 y 30-40 cm, utilizando un TDR Field Scout TDR 100 (Spectrum Technologies ®) para las mediciones de 0-20cm de profundidad y un dispositivo manual ProCheck (Decagon Devices ®) para las mediciones de 30-40cm. Las mediciones se realizaban en tres puntos seleccionados aleatoriamente dentro de cada parcela, donde se habían instalado previamente

varillas a 20 cm de profundidad y sensores tipo 10-HS (Decagon Devices ®) de 30-40 cm verticalmente, adyacentes al sistema radical de las plantas introducidas (**Fig.10**).



**Figura 10:** Fotografía del dispositivo manual ProCheck (Decagon Devices ®) registrando los datos de humedad de 30-40 cm y de 0 a 20 cm de profundidad y TDR 100 (Spectrum Technologies ®), respectivamente. Fuente: fotografía realizada durante las campañas de muestreo.

### **3.6.2. Variables fisiológicas**

Para caracterizar la respuesta fisiológica de las plantas introducidas bajo cubierta se realizaron dos mediciones durante el periodo estival a mediados de verano (julio) y al final del verano (septiembre), después del segundo año de plantación a fin de que permitiese detectar las interacciones de competencia, pudiendo estudiar las posibles diferencias entre los distintos tratamientos aplicados.

#### **3.6.2.1 Fluorescencia de la clorofila:**

En este estudio, se midió la fluorescencia de la clorofila usando un fluorímetro de pulso modulado (PAM) modelo FMS2 (Hansathech Instruments ®), con el fin de observar la máxima eficiencia de la capacidad fotosintética ( $F_v/F_m$ , relación

entre fluorescencia variable y máxima) del PSII de las plantas establecidas en distintos gradientes ambientales generados por alguno de los tratamientos descritos anteriormente. Para ello, se seleccionaron 9 plantas por tratamiento y por especie. Para cada muestreo, se realizó una medida al alba (06:00) y otra al medio día solar (14:00) de las especies seleccionadas. Las mediciones se realizaron en hojas sanas situadas dentro del tubo protector (a través de una ventana de acceso). En las mediciones del mediodía, se colocaron pinzas especiales de adaptación a la oscuridad durante 30 minutos como mínimo antes de realizar la medición (**Fig. 11**).



**Figura 11.** fotografía de pinza de adaptación a la oscuridad sobre una hoja de *Sorbus torminalis* sacada a través de una ventana de acceso del tubo protector (izquierda) y alumno realizando medición al alba con fluorímetro de pulso modulado (derecha). Fuente: fotografías realizadas durante las campañas de medición.

### 3.6.2.2 Potencial hídrico:

El potencial hídrico muestra la presión que hay que ejercer (bares) para movilizar una gota de agua a través de los tejidos vegetales. Por lo que valores de potencial hídrico inferiores, nos indican un mejor estado hídrico de la planta o un menor estrés.



Con el fin de establecer una medida del estrés hídrico de las plantas insertadas bajo el dosel arbóreo, se midió el potencial hídrico en hojas *in situ*, utilizando una cámara de presión Scholander modelo 1000 (PMS Instruments ®). Las mediciones se realizaron de forma simultánea a las de fluorescencia (julio y septiembre) al alba (6:00) y al medio día (14:00). Para el muestreo se seleccionaron 6 plantas por especie y tratamiento.

Para cada medición, se cortó una hoja sana y entera de cada planta seleccionada del interior del tubo protector, procurando dejar un centímetro y medio de peciolo para facilitar las mediciones en las especies que fuera posible. Una vez se cortaba la hoja, se introducía en una bolsa hermética con las identificaciones de planta y tratamiento, y se transportaba hasta la zona de medición en una nevera portátil refrigerada con el fin de disminuir las pérdidas de humedad por transpiración antes de la medición (**Fig. 12**).



**Figura 12.** Fotografía de bolsa hermética identificada con hoja de rebollo y nevera portátil para su transporte (izquierda) y fotografía de mediciones de potencial hídrico al mediodía con bomba Scholander. Fuente: fotografías realizadas durante las campañas de muestreo.

#### **4 Análisis estadísticos:**

Para el análisis estadístico de las variables de respuesta, se ha realizado un análisis de varianza (ANOVA) con el fin de observar si existen diferencias significativas entre tratamientos, intentando probar las hipótesis planteadas. Cuando existía significancia estadística, se realizaron separación de medias de Tukey para poder realizar comparaciones múltiples entre distintos factores.

Adicionalmente, se realizaron correlaciones entre variables para conocer el grado de asociación de estas en cada especie.

En el caso de las medidas de precipitación, se realizó un análisis ANOVA de los valores acumulados de precipitación, según el tratamiento aplicado, de los datos obtenidos desde julio 2018 (inicio del proyecto), hasta octubre 2019. Por su parte, para el análisis de humedad del suelo, se realizó un análisis de medidas repetidas (ANOVAR), ya que se ajustaba mejor a las condiciones de este estudio. En dicho análisis, se probó el efecto de tratamiento de clara (inter-sujeto) así como sus diferencias en el tiempo o fecha (intra-sujeto).

Como variables respuesta o dependientes, se tomaron datos de la fluorescencia de la clorofila, potencial hídrico, humedad del suelo y precipitación de muestras representativas de cada parcela. Las variables explicativas venían determinadas por el tipo de tratamiento aplicados sobre el dosel de pino, el tiempo de medición (julio o septiembre) y la especie seleccionada.

Previo al análisis fueron comprobados los supuestos canónicos de homogeneidad de la varianza y normalidad para todas las variables, cuando no se cumplieron, se hicieron transformaciones logarítmicas o de raíz cuadrada.

Las mediciones de fluorescencia y potencial hídrico de la a segunda campaña (septiembre) tuvo que subdividirse en dos fechas próximas debido a las condiciones meteorológicas adversas. Dado que los valores repetidos obtenidos en las dos subcampañas de septiembre no tenían desviaciones considerables a nivel de individuo, se corrigió esta variable realizando las medias de los datos repetidos obtenidos en las mediciones de la misma planta, pudiendo compilar los datos de las dos campañas de septiembre en una sola base de datos.

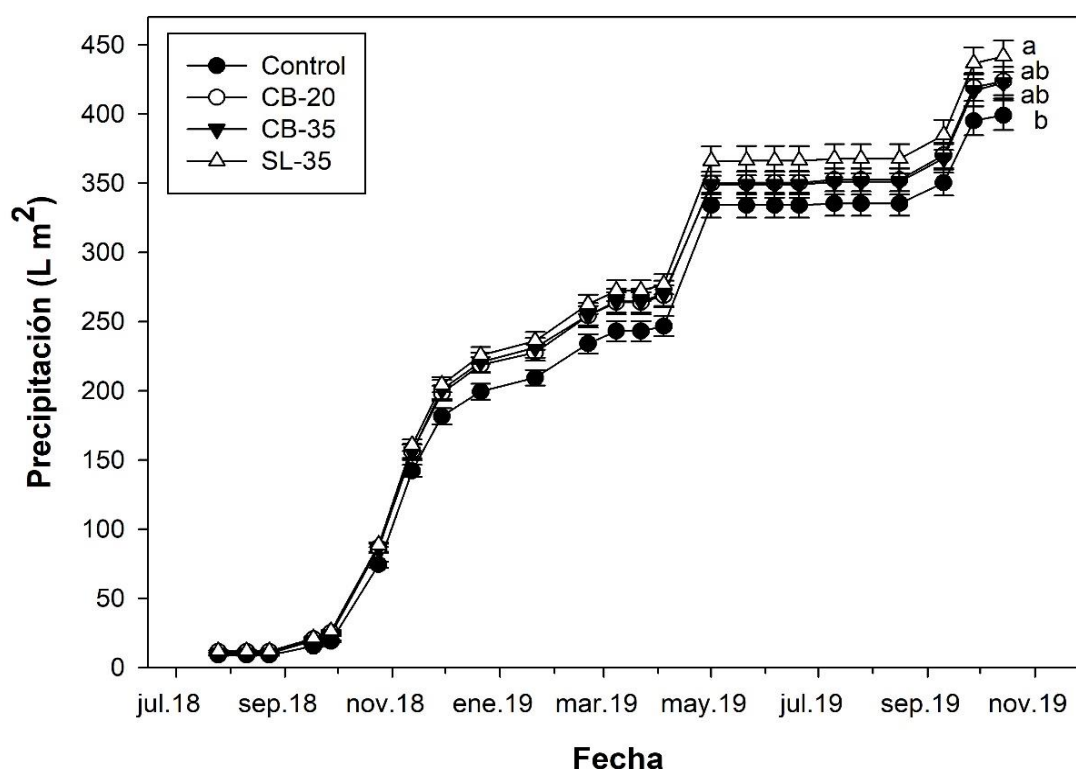
Estos análisis estadísticos fueron realizados con el software libre R (R Core Team, 2019).

## **5 Resultados**

### **5.1 Variables microambientales**

#### **5.1.1 Precipitación:**

En este apartado, se representarán los resultados obtenidos para humedad desde julio 2018 hasta octubre de 2019. Para la elaboración de los análisis estadísticos se utilizaron los valores de precipitación medios acumulados por tratamiento al final del periodo de estudio (octubre 2019). Los resultados muestran los efectos significativos, inducidos por diferentes tratamientos entre los sujetos en cada medición (**Fig. 13**).



**Figura 13.** Gráfica comparativa de la precipitación mensual acumulada en mm (medias ± error estándar) en cada uno de los tratamientos de mejora para el periodo julio 2018-octubre 2019. Las letras indican diferencias significativas entre tratamientos. Tratamientos: Control (sin claras), CB-20: clara baja del 20% del área basimétrica, CB-35: Clara baja del 35% del área basimétrica y SL-35: clara por lo alto de peso fuerte (35%) con selección de árboles de porvenir. Fuente: elaboración propia a través del software estadístico R.

La significación del factor inter-sujeto tratamiento fue atribuida al tiempo o fecha de medición, obteniendo un P valor = 0,0368 (**anexo 1, tabla 1**).

Los mayores valores de precipitación acumulada se recogen en las parcelas donde se ha aplicado cortas de mayor peso, en concreto, en las que se aplicó el

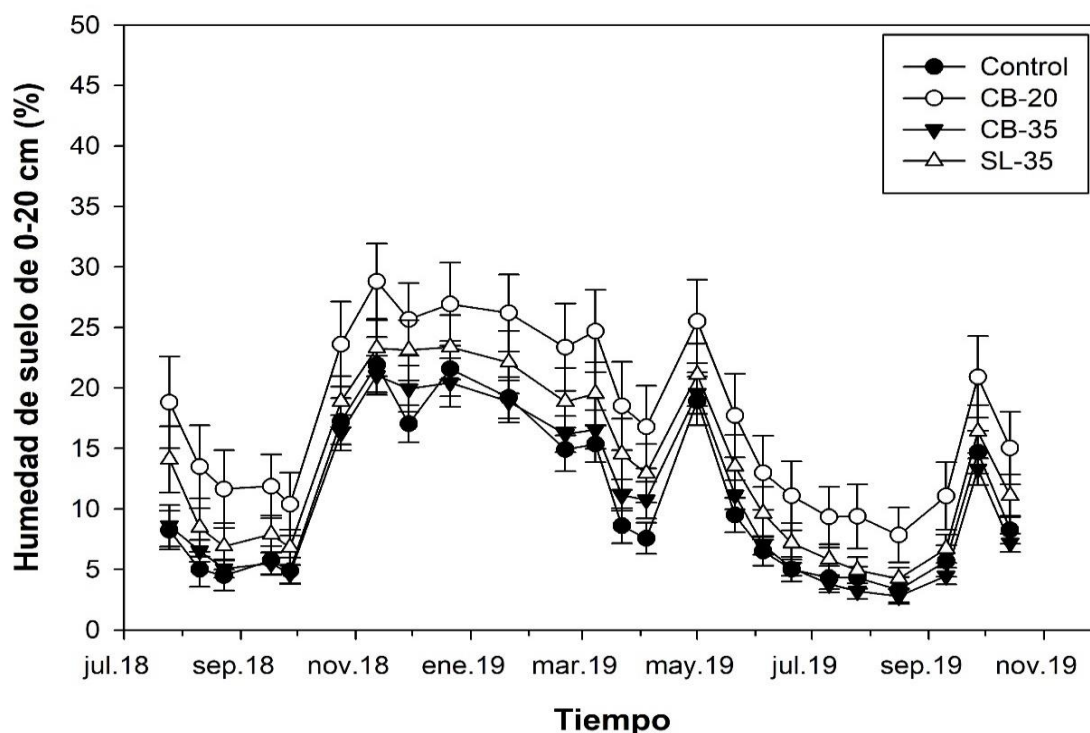
tratamiento de clara por lo alto de peso fuerte (35%) con selección de árboles de porvenir (SL-35) con una densidad de  $344,2 \pm 21,3$  pies/ha. Los menores valores se recogieron en las parcelas control, con una densidad de pies por hectárea de  $537,4 \pm 31,8$  (véase **tabla 1**, materiales y métodos).

### **5.1.2 Humedad del suelo:**

A continuación, se reportarán por separado los datos de humedad del suelo a una profundidad de 0-20 cm y de 30-40 cm.

#### **5.1.2.1 Humedad del suelo a una profundidad de 0-20 cm:**

Se obtuvo una alta significancia estadística para el factor intra-sujeto (fecha), lo cual resulta evidente debido a las diferencias estacionales de humedad propiciada por la precipitación. Por otro lado, no se obtuvo significancia estadística para el factor inter-sujeto tratamiento, P valor= 0,0655 (**anexo 1, tabla 2**). Esta ausencia de significancia atribuida a los tratamientos de clara puede ser debida a las variaciones no controlables de las condiciones intrínsecas de las diferentes parcelas, tales como tipo de suelo, orientación o textura. Dado que la profundidad de medida es muy superficial, la humedad puede perderse por evaporación o infiltración rápidamente, haciendo desvanecerse las diferencias entre tratamientos. En la **figura 14**, puede observarse el solapamiento entre tratamientos. No obstante, se aprecia una humedad en el suelo mayor generalizada para el tratamiento de clara baja del 20%, mientras que en las parcelas control se detectaron los menores porcentajes de humedad a una profundidad de 0-20cm durante el período de medición.



**Figura 14.** Gráfica de la evolución de la humedad del suelo (%) de 0-20 cm de profundidad en relación con el tratamiento aplicado sobre el dosel arbóreo en para todo el periodo julio 2018-octubre 2019. Datos provenientes de medias  $\pm$  error estándar. Tratamientos: Control (sin claras), CB-20: clara baja del 20% en área basimétrica, CB-35: Clara baja del 35% en área basimétrica y SL-35: clara por lo alto de peso fuerte (35%) con selección de árboles de porvenir. Fuente: elaboración propia a través del software estadístico R.

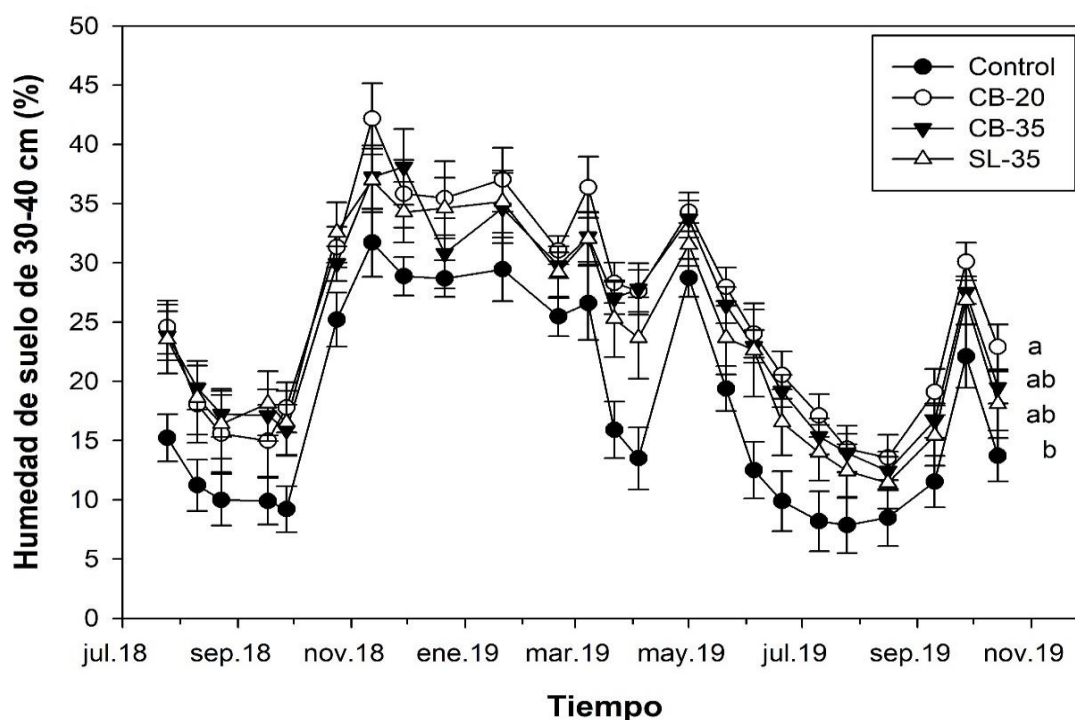
### 5.1.2.2 Humedad del suelo a una profundidad de 30-40 cm:

A diferencia del caso anterior, la humedad a 30-40 cm era retenida por más tiempo dada la mayor profundidad, observando diferencias significativas en función del tratamiento (efecto inter-sujeto) y por tiempo (efecto intra-sujeto).

#### 5.1.2.2.1 Interacción Fecha\*tratamiento:

Se obtuvo significancia estadística en los datos de humedad del suelo (medida a de 30-40 cm de profundidad) tras cruzar los datos de fecha y tratamiento, obteniendo un P valor = 0,012 (**anexo 1, tabla 2**). El factor fecha se refiere a los meses en el que se realizó la medición (julio-septiembre).

Como se muestra en la **figura 15**, el tratamiento de clara baja del 20% fue el más eficaz en la retención de humedad de 30-40 cm de profundidad. Por otro lado, las parcelas control, registran los valores más bajos para esta variable seguidas del tratamiento SL-35%. Para el período concreto en el que se realizaron las mediciones de las variables fisiológicas (julio-septiembre), encontramos diferencias de hasta un 10% en los valores de humedad entre las parcelas control y las tratadas con una clara baja del 20% para el periodo más seco. Se observa una recuperación de la humedad del suelo a partir del mes de septiembre (2019), reduciéndose las diferencias entre tratamientos.



**Figura 15.** Gráfica de la evolución de la humedad del suelo (%) de 30-40 cm de profundidad en relación con el tratamiento aplicado sobre el dosel arbóreo en para todo el periodo julio 2018-octubre 2019. Datos provenientes de medidas repetidas  $\pm$  desviación estándar. Las letras indican diferencias significativas entre tratamientos. Tratamientos: Control (sin claras), CB-20: clara baja del 20% en área basimétrica, CB-35: Clara baja del 35% en área basimétrica y SL-35: clara por lo alto de peso fuerte (35%) con selección de árboles de porvenir. Fuente: elaboración propia a través del software estadístico R.

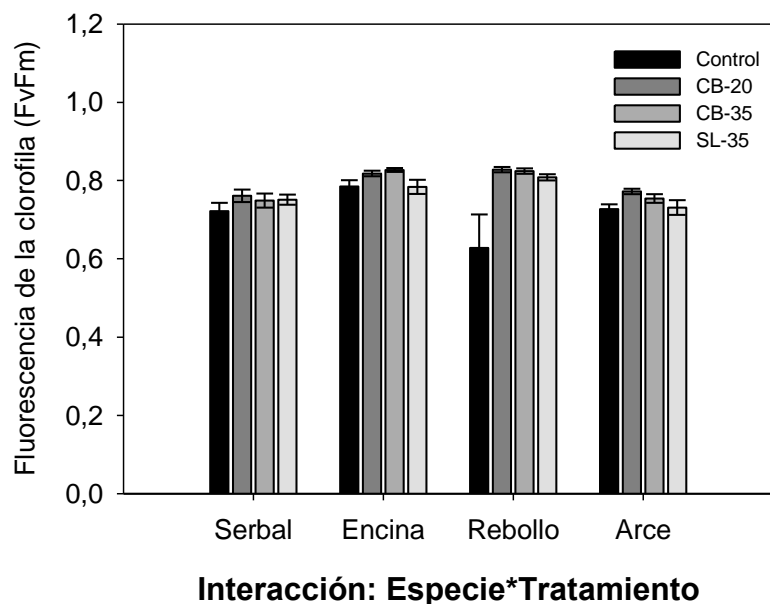
## 5.2 Fluorescencia de la clorofila (Fv/Fm):

Una vez realizados los análisis estadísticos, no se obtuvo significancia para la interacción entre los factores tiempo\*especie (véase **anexo 1, tabla 3**), por lo que no se incluirá en la exposición de resultados.

### 5.2.1 Interacción Especie\*Tratamiento:

Se encontraron efectos significativos marginales en las mediciones de la eficiencia fotosintética máxima según la especie establecida en el sotobosque en función del tratamiento aplicado sobre el dosel, independientemente del momento de medición, obteniendo un P valor=0,0559 (**anexo 1, tabla 3**).

Como puede observarse en la **figura 16**, todas las especies estudiadas presentan niveles de Fv/Fm menores en las parcelas control, sobre las que no se ha aplicado ningún tratamiento de clara. Las diferencias en los valores de Fv/Fm entre las parcelas donde se ha intervenido el dosel son escasas para todas las especies. Se observan valores de fluorescencia ligeramente mayores en las quercíneas (encina y rebollo) en las parcelas donde se ha realizado algún tratamiento de reducción de la masa. Es en la especie *Quercus pyrenaica* donde más difieren los valores de Fv/Fm en las parcelas con algún tratamiento en comparación con las parcelas control, lo cual evidencia considerables niveles de estrés de esta especie en condiciones de elevada competencia.



**Figura 16.** Gráfica de medias  $\pm$  error estándar de fluorescencia de la clorofila (Fv/Fm) medidas en muestras representativas de cuatro especies de planifolias introducidas bajo cubierta de pino sobre la que se han aplicado distintos tratamientos (factor). Tratamientos: Control (sin claras), CB-20: clara baja del 20% en área basimétrica, CB-35: Clara baja del 35% en área basimétrica y SL-35: clara por lo alto de peso fuerte (35%) con selección de árboles de porvenir. Fuente: elaboración propia a través del software estadístico R.

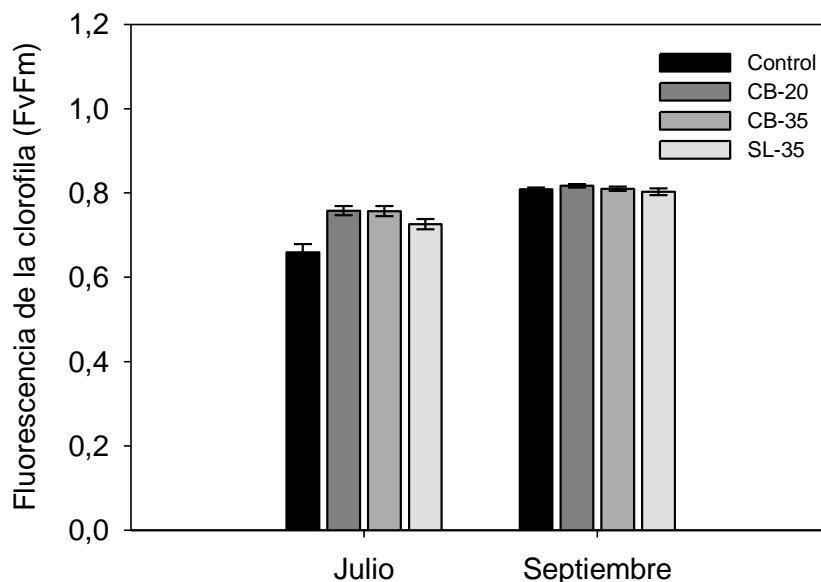
### 5.2.2 Interacción Tiempo\*Tratamiento:

Se obtuvo una elevada significancia estadística cruzando los factores tiempo (mes) y tratamiento, independientemente de la especie medida, obteniendo un P valor= 0,0001 (**anexo 1, tabla 3**). El factor tiempo se refiere al momento de las mediciones (julio o septiembre) las cuales se realizaron en momentos distintos con condiciones ambientales distantes, a mediados y al final de la época estival en ambientes mediterráneos.

Se observan diferencias consistentes entre tratamientos según el tiempo en el que se realizaron las mediciones (**Fig. 17**). De este modo, observamos que, en julio, con condiciones ambientales más adversas (sequía y elevadas temperaturas) los valores de fluorescencia son menores en todas las parcelas, especialmente en los controles, en comparación a septiembre, donde las



condiciones ambientales fueron menos estresantes (mayor humedad y menores temperaturas).



### Interacción: Tiempo\*Tratamiento

**Figura 17.** Gráfica de medias  $\pm$  error estándar de fluorescencia de la clorofila (Fv/Fm) medidas en momentos distintos (factor tiempo) de las campañas de muestreo de julio y septiembre en parcelas donde se han realizado claras de diferentes pesos (factor tratamiento). Tratamientos: Control (sin claras), CB-20: clara baja del 20% en área basimétrica, CB-35: Clara baja del 35% en área basimétrica y SL-35: clara por lo alto de peso fuerte (35%) con selección de árboles de porvenir. Fuente: elaboración propia a través del software estadístico R.

En las mediciones realizadas en septiembre, las diferencias de los valores de fluorescencia entre tratamientos se anulan, siendo prácticamente inexistentes. Son los tratamientos de clara baja del 20 y el 35% en área basimétrica los que mayores valores de fluorescencia de la clorofila presentan, por lo que se puede asumir que son los más efectivos en la reducción del estrés al que están sometidas las plantas. Como vemos, en las parcelas control, donde la competencia es mayor debido a la elevada densidad, las especies estudiadas presentan mayores niveles de estrés expresados mediante valores de fluorescencia menores en comparación con el resto de los tratamientos.

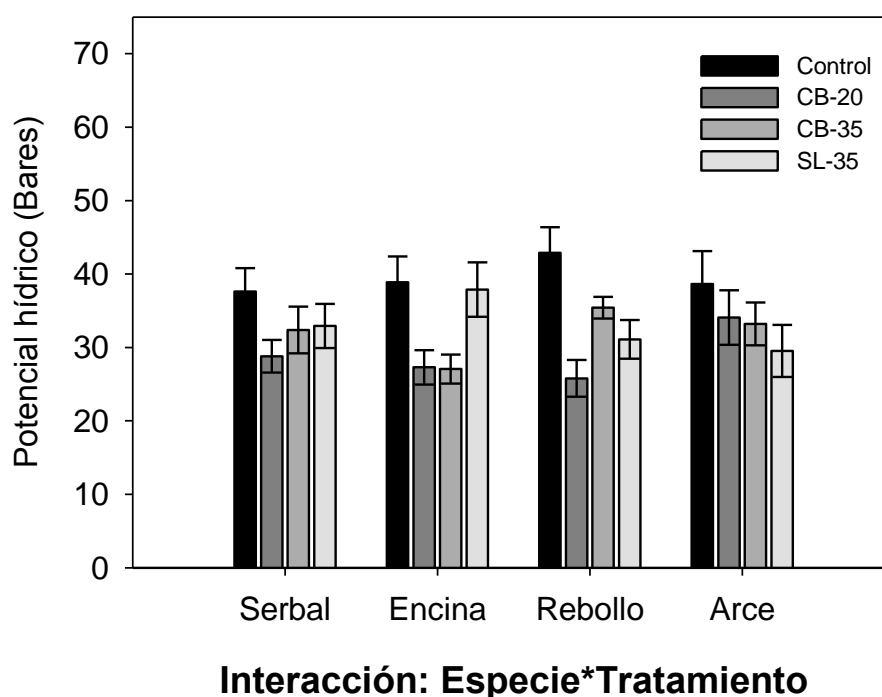
### 5.3 Potencial Hídrico:

Todas las interacciones dobles resultaron estadísticamente significativas (**anexo 1, tabla 3**).

#### 5.3.1 Interacción Especie\*Tratamiento:

Se obtuvo significancia estadística cruzando los factores especie y tratamiento, de manera independiente al tiempo en el que se llevaron a cabo las mediciones, obteniendo un P valor=0,0018 (**anexo 1, tabla 3**)

Como puede observarse en la **figura 18**, todas las especies estudiadas presentan valores de potencial hídrico mayores en las parcelas control, donde no se ha llevado a cabo ninguna intervención de la masa de pinar.



**Figura 18.** Gráfica de medias  $\pm$  error estándar de potencial hídrico medido en 4 especies de planifolias distintas según el tratamiento aplicado sobre el dosel arbóreo. Tratamientos: Control (sin claras), CB-20: clara baja del 20% en área basimétrica, CB-35: Clara baja del 35% en área basimétrica y SL-35: clara por lo alto de peso fuerte (35%) con selección de árboles de porvenir. Fuente: elaboración propia a través del software estadístico R.

La especie *Sorbus torminalis* presenta los menores valores de potencial hídrico bajo el tratamiento de clara baja del 20% del área basimétrica, encontrándose bajo condiciones de menor estrés en este tratamiento. No hay diferencias

significativas en los valores de potencial obtenidos en los tratamientos de clara baja del 35% y clara por lo alto de peso fuerte (35% área basimétrica).

En la especie *Quercus ilex*, los menores valores de potencial hídrico, y por tanto las situaciones menos estresantes para esta especie, se dieron bajo los tratamientos de clara baja del 20 y 35%. En el tratamiento de clara por lo alto de peso fuerte (35%) los valores de potencial son similares a los obtenidos al control, lo que indica que esta especie presentaría niveles de estrés semejantes en ambas parcelas.

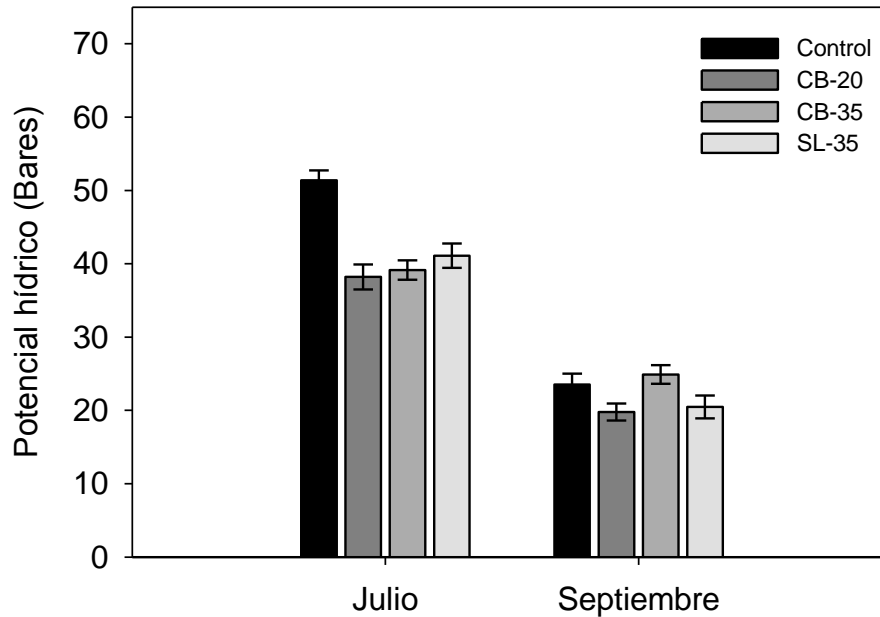
Los menores niveles de estrés en *Quercus pyrenaica* se dan bajo el tratamiento de clara baja del 20%, aumentando ligeramente bajo el tratamiento SL-35 y en mayor medida bajo el tratamiento de clara baja del 35%.

En cuanto a *Acer monspesulanum*, se observa una tendencia clara de reducción de los valores de potencial hídrico (menor estrés) conforme se va abriendo más la masa, obteniendo los mejores valores en el tratamiento de clara por lo alto de peso fuerte (35%) con selección de árboles de porvenir. En esta especie en concreto, una mayor liberación de la competencia a través de claras de más peso parece derivar en unas condiciones más propicias para el mejor desarrollo de la especie.

### **5.3.2 Interacción Tiempo\*Tratamiento:**

Se encontró una elevada significancia estadística para en las interacciones entre el tiempo (fecha de la medición) y el tratamiento, independientemente de la especie medida, obteniendo un P valor=0,0001 (**anexo1, tabla 3**).

Como se muestra en la **figura 19**, se evidencia una diferencia significativa entre las distintas campañas de medición. En la campaña de julio, encontramos valores mayores de potencial hídrico, deduciendo por tanto niveles mayores de estrés independientemente de la especie. Los mayores valores de potencial se dan en las parcelas control, reduciéndose en las parcelas donde se ha aplicado algún tratamiento de mejora. Las diferencias entre distintos tratamientos son escasas, observando una leve tendencia al alza, según se aumenta el peso de las claras.



### Interacción: Tiempo\*Tratamiento

**Figura 19.** Gráfica de medias  $\pm$  error estándar de potencial hídrico medido en momentos distintos (factor tiempo) de las campañas de muestreo de julio y septiembre en parcelas donde se han realizado claras de diferentes pesos (factor tratamiento). Tratamientos: Control (sin claras), CB-20: clara baja del 20% en área basimétrica, CB-35: Clara baja del 35% en área basimétrica y SL-35: clara por lo alto de peso fuerte (35%) con selección de árboles de porvenir. Fuente: elaboración propia a través del software estadístico R.

Por otro lado, en las mediciones obtenidas en la campaña de septiembre las diferencias entre los distintos tratamientos no siguen el mismo patrón que en julio, debido a que las condiciones climáticas fueron más favorables, al reducir y favorecer la disponibilidad de humedad, lo que hizo patente el papel competidor o facilitador de los tratamientos de clara.

Comparando ambas campañas de muestreo se observa un aumento de poco más de la mitad de los valores medios de potencial hídrico en los datos de julio respecto a los de septiembre.

### 5.3.3 Interacción Tiempo\*Especie:

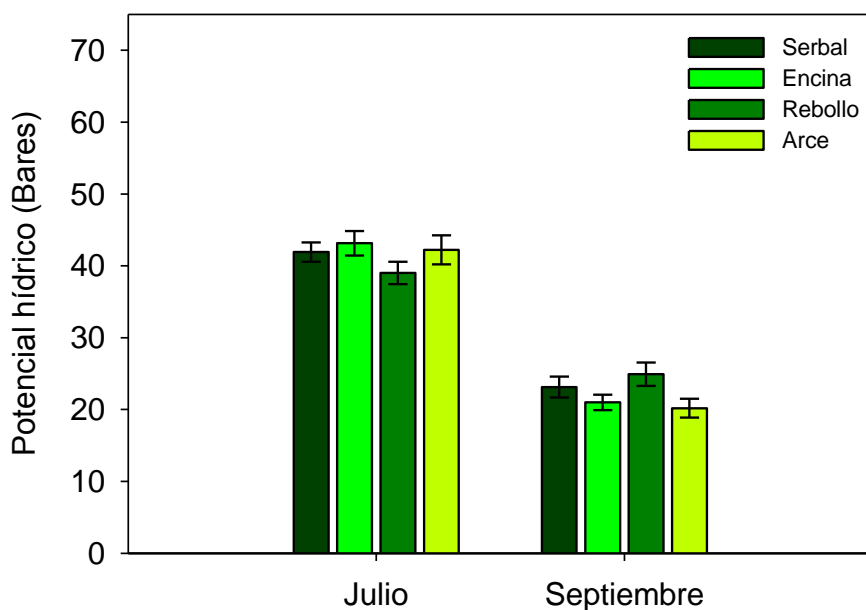
Los valores de potencial hídrico variaron significativamente mediante la interacción entre los factores tiempo (época de la medición) y especies medidas,

independientemente del tratamiento que se aplicase sobre la cubierta. Se registró un P valor= 0,0014 (**anexo 1, tabla 3**).

Como se representa en la **figura 20**, los valores de potencial hídrico difieren de manera considerable en cada momento de medición (julio-septiembre), encontrando los valores más elevados de potencial, y por lo tanto de estrés, en los datos obtenidos en julio respecto a los de septiembre en todas las especies seleccionadas para este estudio.

En el mes de julio, se observa una tendencia interespecífica similar para todas las especies, a excepción de la especie *Quercus pyrenaica*, que presenta valores de potencial hídrico ligeramente inferiores al del resto de especies.

En cuanto al mes de septiembre, se observan valores de potencial hídrico más elevados en la especie *Quercus pyrenaica*, seguidos por *Sorbus torminalis*. Por su parte, *Quercus ilex* y *Acer monspesulanum* presentan valores similares de esta variable.



**Interacción: Tiempo\*Especie**

**Figura 20.** Gráfico de medias  $\pm$  error estándar de potencial hídrico medido en cuatro especies de planifolias en diferentes tiempos (julio y septiembre de 2019). Fuente: elaboración propia a través del software estadístico R.

## **6 Discusión:**

En este apartado, se discuten de manera independiente los resultados obtenidos en cada variable respuesta para los resultados de variables microambientales y fisiología.

### **6.1 Precipitación:**

Como se expuso en el apartado de resultados, los mayores valores acumulados para todo el periodo de estudio se dieron en el tratamiento con una menor densidad de pies/ha final (SL-35) en contraposición a las parcelas control, donde se registraron los menores valores. Estos resultados demuestran la reducción significativa de la intercepción de las precipitaciones por el dosel conforme se aumenta el peso de las claras.

Estudios previos han demostrado el efecto positivo en la entrada de agua bajo cubierta en pinares de repoblación mediterráneos, mediante la aplicación de claras de intensidad moderada-alta, logrando llegar a reducir la intercepción hasta en un 15% (Granados et al., 2016). Por su parte, Mazza et al. (2011), también reportaron efectos positivos de la reducción de densidad mediante claras en pinares mediterráneos de *Pinus halepensis*. En concreto, ambos estudios demostraron que la aplicación de tratamientos de adelgazamiento moderados reducía de manera considerable la pérdida de agua por intercepción y aumentaba la cantidad neta de agua bajo el dosel, especialmente durante períodos secos.

### **6.2 Humedad del suelo:**

Como indican levemente los resultados a una profundidad de 0-20 cm y más consistentemente a una profundidad de 30-40 cm, las parcelas bajo el tratamiento CB-20% fueron las más eficaces en la retención de la humedad en el suelo procedente de las precipitaciones, especialmente durante los meses más secos.

La falta de consistencia de estos resultados en la humedad de suelo a una profundidad de 0-20 cm puede ser atribuida a otros factores inherentes a la

situación de las parcelas, pero que no son objeto de este estudio, tales como las condiciones de sitio y orientación de cada parcela.

Al respecto, diversos estudios realizados sobre pinares de repoblación en clima mediterráneo han demostrado que una elevada densidad de pies puede reducir en gran medida la humedad presente en el suelo por las mayores tasas de transpiración del pinar denso (Bellot et al., 2004; Rodríguez-Calcerrada et al., 2008).

Otros estudios similares han demostrado como la realización de tratamientos de mejora sobre masas de pino carrasco de repoblación puede aumentar la disponibilidad de agua en el suelo (Olivar et al., 2015). Este aumento de humedad puede ser utilizado por otras plantas para su establecimiento y desarrollo, dotando de capacidad de cambio de estas masas puras de repoblación hacia masas mixtas, con una resiliencia superior frente a posibles perturbaciones futuras.

En las parcelas sobre las que se aplicó el tratamiento SL-35%, a pesar de ser en las que menos intercepción de agua en el dosel se daba, es el tratamiento (a excepción del control) que menor humedad de suelo presenta para todo el período estudiado. Estos resultados sugieren que, a bajo cierto nivel de apertura de la masa, predominan los efectos de demanda evaporativa frente a los de retención de agua debido al aumento excesivo de la irradiación y la temperatura del suelo (Granados et al., 2016).

### **6.3 Fluorescencia de la clorofila:**

Se ha demostrado que diferentes factores abióticos como la sequía, modificaciones de la intensidad lumínica y deficiencias de nutrición entre otros, afectan al funcionamiento del fotosistema II (PSII) induciendo cambios en la emisión de fluorescencia (Santos, 2004; Neto et al., 2011). Estos cambios pueden ser utilizados para cuantificar los niveles de respuestas al estrés (González et al., 2008).

Como se describió con anterioridad en el apartado de resultados, los valores de fluorescencia de la clorofila fueron menores para todas las especies en las

parcelas control cuando las condiciones ambientales adversas acentuaron las interacciones de competencia lumínica entre individuos. Estos resultados demuestran que la aplicación de tratamientos selvícolas sobre la masa de *Pinus pinaster* reducen la competencia y, por lo tanto, el estrés de las plantas establecidas en el sotobosque, propiciando condiciones favorables para el establecimiento de nuevas plantas y creando condiciones propicias para la sucesión ecológica dentro de estos ecosistemas artificiales. Efectos semejantes fueron obtenidos por de Fernández et al. (2017), en su estudio para las especies *Arbutus Unedo* y *Fraxinus ornus*.

Entre tratamientos, no existen variaciones considerables, pero si puede afirmarse que la no actuación provoca una disminución en los valores de fluorescencia y, en definitiva, un incremento del estrés al que están sometidas las plantas del sotobosque en épocas de sequía estival.

En cuanto a los resultados obtenidos por tratamiento según el tiempo de la medición (julio o septiembre) se aprecian variaciones considerables para todos los tratamientos en función de la temporalidad de las mediciones. En las mediciones realizadas en septiembre, cuando las condiciones de humedad eran más elevadas debido a un aumento de las precipitaciones, las diferencias entre tratamientos se ven anuladas. En cambio, los resultados de julio, mes más seco, puede verse una variación considerable de valores de fluorescencia entre tratamientos, lo cual confirma que, bajo condiciones de sequía, la aplicación de algún tratamiento puede reducir los niveles de estrés de las plantas.

Para todas las especies estudiadas, se observó una leve tendencia a la disminución de los valores de fluorescencia en las parcelas sobre las que se había realizado algún tratamiento conforme se aumentaba el peso de la clara. Estos resultados sugieren que, si se abre demasiado el dosel, las especies seleccionadas se verán perjudicadas negativamente debido a su temperamento tolerante a la sombra. Estos resultados son equivalentes a los obtenidos por Mitchel (1998) en su estudio sobre la aclimatación a la luz de el tejo del Pacífico (*Taxus brevifolia*), en el cual encontraban valores inferiores de Fv/Fm en hojas de plantas crecidas a plena luz, comparadas con las crecidas bajo condiciones de sombra.



#### 6.4 Potencial hídrico:

Como se expuso en el apartado de resultados, en las parcelas control los datos de potencial hídrico eran más elevados para todas las especies introducidas comparados con las parcelas sobre las que se había realizado algún tratamiento de clara. Estos resultados confirman la hipótesis inicial de que con la aplicación de tratamientos de mejora sobre la masa dominante de *Pinus pinaster*, el estrés hídrico de las especies seleccionadas disminuye de forma considerable en relación con las parcelas control. En concreto, el tratamiento de clara baja del 20%, al igual que en la humedad de suelo a ambas profundidades, fue el más eficaz en la disminución del estrés hídrico para todas las especies a excepción de *Acer monspesulanum*, que mostró una respuesta directa al reducir el potencial hídrico conforme aumentó la apertura del dosel. Dentro de los tratamientos de clara en general, se observa una ligera tendencia al aumento del estrés hídrico conforme se aumenta el peso de la clara. En estudios similares, se demostró que la aplicación de claras con un peso elevado conllevaba a la caracterización de un microambiente dominado por una alta demanda evaporativa, altas temperaturas y altos niveles de radiación (Chaves et al., 2002), lo que se traduce en un incremento del estrés hídrico para las plantas en el sotobosque.

En relación con el tiempo de medición, los resultados de este estudio demuestran la eficacia en la reducción del estrés hídrico, independientemente de la especie, mediante la reducción de la cobertura a través de claras, lo cual mejora las condiciones microambientales de la masa en comparación con las parcelas control (sin intervención). Este efecto es más patente cuando las condiciones ambientales se recrudecen a medio verano, disipándose estas diferencias cuando la disponibilidad de recursos hídricos es más abundante. Esto revela que, bajo las condiciones existentes de elevada densidad, la penetración de la humedad en el suelo es escasa mientras que la interceptación de las precipitaciones por el dosel es mayor, lo que incrementa el estrés hídrico de las especies existentes en el sotobosque bajo condiciones de sequía estival, típica de ambientes mediterráneos.

En general, las especies estudiadas presentaron un nivel de estrés más elevado en las mediciones realizadas en julio respecto a las de septiembre, debido a la

escasez de precipitaciones como es típico en los veranos de este tipo de climas. Sin embargo, la variación por especie según el tiempo de medición (mes), puede deberse a que algunas especies poseen características anatómicas, y mecanismos de resistencia que les permiten responder de manera distinta ante diferentes ambientes, como el mayor peso específico y grosor de las cutículas en las hojas de encina, con el fin de reducir la transpiración residual (Abdala-Roberts et al., 2018).

Estos resultados concuerdan con los estudios de Granados et al. (2016), en ellos demostraron el posible funcionamiento del dosel de pino como facilitador de diversas especies presentes en el piso inferior en condiciones de irradiación intermedia (a través de claras de peso moderado), disminuyendo el estrés debido a la alta irradiación y desecación. Por su parte, Holmgren (2011) observó en su metaanálisis que el estrés hídrico podía volverse más severo con niveles de luz muy altos o muy bajos, en función de la densidad de la masa y el temperamento de las especies. Estos resultados sugieren que, mediante un tratamiento de clara moderada, pueden exacerbarse las interacciones de facilitación frente a las de competencia entre las especies, generando un hábitat menos estresante y más propicio para la llegada y posterior establecimiento de diversas especies de la sucesión ecológica.

## **7 Conclusiones:**

Las diferencias interespecíficas en las respuestas fisiológicas de las plantas introducidas bajo la cubierta de pinar estuvieron asociadas a su temperamento en interacción con el microambiente propiciado por las claras, siendo las quercíneas encina y rebollo las que mejor respondieron frente a tratamientos de claras de peso moderado.

La aplicación de claras de peso moderado puede reducir el estrés hídrico y lumínico de plantas de sucesión secundaria bajo cubierta de pinares monoespecíficos provenientes de repoblación, al mejorar el microambiente en el sotobosque para el establecimiento de especies rebrotadoras.

Los efectos beneficiosos de los tratamientos de clara son más evidentes en condiciones ambientales estresantes. En condiciones de abundancia de recursos hídricos, las diferencias entre tratamientos se reducen.

La alta densidad de la cubierta de pinar afecta negativamente al ambiente en el sotobosque, mediante el aumento de la competencia e intercepción de precipitaciones en detrimento de la disponibilidad de humedad y luz para las plantas en el sotobosque.

A pesar de una mayor entrada de agua con el aumento del peso de la clara (mediante la reducción de la intercepción), también se consigue un aumento de la insolación y, por lo tanto, de la temperatura, aumentando la demanda evaporativa, lo que se traduce en un mayor estrés hídrico para las especies estudiadas.

## **8 Agradecimientos:**

Al doctor Juan A. Oliet Palá por su desempeño como director en la realización del presente estudio.

Al doctorando José Luis García Pérez, por su apoyo y codirección durante la elaboración de esta memoria, además de su agradable compañía durante las campañas de muestreo.

A los docentes que creyeron en mí y me transmitieron su motivación.

## 9 Bibliografía:

Abdala-Roberts L., Galmán A., Petry W., Covelo F., de la Fuente M., Glauser G. y Moreira X., 2018. Interspecific variation in leaf functional and defensive traits in oak species and its underlying climatic drivers. *PLOS ONE* (8): 1-13.

Agencia Estatal de Meteorología (AEMet), 2019. Proyecciones climáticas para el siglo XXI: Resultados gráficos. Disponible en: [http://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/cambio\\_climat/result\\_graficos?opc4=1&opc6=0](http://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/cambio_climat/result_graficos?opc4=1&opc6=0), [Consultado: 26/09/2019].

Aranda I., Gil L. y Pardos J., 2001. Effects of thinning in a *Pinus sylvestris* L. stand on foliar water relations of *Fagus sylvatica* L. seedlings planted within the pinewood. *Trees* (15): 358-364.

Balvanera P., 2012. Los servicios ecosistémicos que ofrecen los bosques tropicales. *Ecosistemas* 21 (1-2): 136-146.

Bellot J., Maestre F., Chirino E., Hernández H., y de Urbina J., 2004. Afforestation with *Pinus halepensis* reduces native shrub performance in a Mediterranean semiarid area. *Acta Oecologica* (25): 7-15.

Chaves M., Pereira J., Maroco J., Rodriegues M., Ricardo C., Osório M., Carvalho I., Faria T. y Pinheiro C., 2002. How Plants Cope with Wather Stress in the Field. Photosynthesis and Growth. *Annals of Botany* (89): 907-916.

Chen H., 2003. "Characteristics of Light Availability Under Forest Canopies and Its Influences on Photosynthesis of Understory Plants". *Forestry Studies in China* 5(3): 54-62.

de Frutos S., 2017. Proyecto de diseño e instalación del dispositivo experimental del proyecto selvícola experimental para el proyecto FORADMIT en Júcar (Guadalajara). Proyecto de Fin de Grado. Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Montes, Forestal y del Medio Natural. Universidad Politécnica de Madrid. 82 p. Fernández C., Gavinet J., Prévosto B., 2016. "Introducing resprouters to enhance Mediterranean forest resilience: importance of functional traits to select species according to a gradient of pine density". *Journal of Applied Ecology*: 1-11.

García-Rodrigo M., 2019. Estudio del efecto de las claras sobre el ambiente del sotobosque y la respuesta morfo-fisiológica de cuatro especies planifolias introducidas bajo cubierta de *Pinus pinaster* Ait. Proyecto de Fin de Grado. Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Montes, Forestal y del Medio Natural. Universidad Politécnica de Madrid. 82 p.

Gavinet J., Vilagrosa A., Chirino E., Granados M. E., Vallejo V. R. y Prévosto B., 2015. "Hardwood seedlings establishment below Aleppo pine depends on thinning intensity in two Mediterranean sites". *Annals of Forest Science* (72): 999–1008.

Google Inc., 2018. *Google Earth Pro Inc., version 7.3.2.5491*. Desarrollado por Google. Disponible en: <https://google-earth-pro.softonic.com/>, Consultado [20/09/2019]

González S., H. Perales H. y Salcedo M., 2008. La fluorescencia de la clorofila a como herramienta en la investigación de efectos tóxicos en el aparato fotosintético de plantas y algas. *Revista de Educación Bioquímica* 27(4): 119-129.

Granados M., Vilagrosa A., Chirino E., Vallejo V. R., 2016. Reforestation with resprouter species to increase diversity and resilience in Mediterranean pine forests. *Forest Ecology and Management* (362): 231-240.

Haase D., 2008. Understanding forest seedling quality: measurements and interpretation. *Tree Planters' Notes* (52): 24-30.

Holmgren M., Gómez-Aparicio L., Quero J.L., Valladares F., 2011. Non-linear effects of drought under shade: reconciling physiological and ecological models in plant communities. *Oecologia* (169): 293–305.

Instituto Geológico Nacional (IGN), 2009. Mapa de suelos de España: Escala 1:1.000.000. Disponible en: <http://www.ign.es/web/catalogo-cartoteca/resources/html/030769.html>, Consultado [20/09/2019].

Instituto Geológico y Minero Español (IGME), 2019. Cartografía geológica del IGME. Disponible en: <http://www.igme.es/>, Consultado [20/09/2019].

Instituto Nacional de Estadística (INE), 2017. España en cifras, pp 2-55. Disponible en: [https://www.ine.es/prodyser/espa\\_cifras/2017/index.html#1](https://www.ine.es/prodyser/espa_cifras/2017/index.html#1) [Consultado: 1-10-2019].

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2012. Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field C., Barros V., Stocker T., Qin D., Dokken D., Ebi K., Mastrandrea M., Mach K., Plattner G., Allen S., Tignor M., y Midgley P. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, 528pp.

IUSS Working Group WRB, 2015. Base referencial mundial del recurso suelo 2014, Actualización 2015. Sistema internacional de clasificación de suelos para la nomenclatura de suelos y la creación de leyendas de mapas de suelos. Informes sobre recursos mundiales de suelos 106. FAO, Roma.

Jennings S., Brown N. y Sheil D., 1999. Assessing forest canopies and understory illumination: canopy closure, canopy cover and other measures. *Forestry* 72(1).

Lu D., Wang G., Zhang J., Fang Y., Zhu C., Zhu J., 2018. "Converting larch plantations to mixed stands: Effects of canopy treatment on the survival and growth of planted seedlings with contrasting shade tolerance". *Forest Ecology and Management* (409): 19–28.

Machado M., Benito G., Barriendos M., Rodrigo F., 2011. 500 Years of rainfall variability and extreme hydrological events in southeastern Spain drylands. *Journal of Arid Environment* (75): 1244-1253.

Madrigal A., 1998. Problemática de la ordenación de masas artificiales en España. Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales (SECF) nº 6 (febrero 1998): 13-20.

Mazza G., Armorino E., Cutini A. y Manetti M., 2011. The influence of thinning on rainfall in Mediterranean coastal stands (Castel Fusano-Rome). *Annals of Forest Science* (68): 1323-1332.

Mitchell A., 1998. Acclimation of Pacific yew (*Taxus brevifolia*) foliage to sun and shade. *Tree Physiology* (18): 749-757.

Mola I., Sopeña A. y de Torre R. (eds). 2018. Guía Práctica de Restauración Ecológica. Fundación Biodiversidad del Ministerio para la Transición Ecológica. Madrid. 77 pp Disponible en: <https://ieeb.fundacion-biodiversidad.es/content/guia-practica-de-restauracion-ecologica> [Consultado: 17/09/2019]

Neto A., Amorim P., Pereira D. y Conceição A., 2011. Fluorescência da clorofila como uma ferramenta possível para seleção de tolerância à salinidade em girasol. *Revista Ciencia Agronômica* (42): 893-897.

Olivar J., Bogino S., Rathgeber C., Bonnesoeur V., Bravo F., 2015. Thinning has a positive effect on growth dynamics and growth–climate relationships in Aleppo pine (*Pinus halepensis*) trees of different crown classes. *Annals of Forest Science* 71 (3): 395-404.

Pausas J., Blad C., Valdecantos A., Seva P., Fuentes D., Alloza A., Vilagrosa A., Bautista S., Cortina J. y Vallejo R., 2004. “Pines and oaks in the restoration of Mediterranean landscapes of Spain: New perspectives for an old practice - a review”. *Plant Ecology* (171): 209-220.

Pausas J. y Paula S., 2012. “Fuel shapes the fire-climate relationship: evidence from Mediterranean ecosystems”. *Global Ecology and Biogeography* (21): 1074–1082.

Puerta-Piñero C., Brotons L., Coll L. y González-Olabarría J.R., 2012. “Valuing acorn dispersal and resprouting capacity ecological functions to ensure Mediterranean forest resilience after fire”. *European Journal of Forest Research* (131): 835–844.

Reid W.; Mooney H., Cropper A., Capistrano D., Carpenter S., Chopra K., Dasgupta P., Dietz T., Duraiappah A., Hassan R., Kaspersen R., Leemans R., May R., McMichael T., Pingali P., Samper C., Scholes R., Watson R., Zakri A., Shidong Z., Ash N., Bennett E., Kumar P., Lee M., Raudsepp-Hearne C., Simons H., Thonell J., y Zurek M., 2005. Evaluación de los Ecosistemas del Milenio. Informe de Síntesis. Disponible en: <http://millenniumassessment.org> Consultado [24/09/2019]

Santos C., 2004. Regulation of chlorophyll biosynthesis and degradation by salt stress in sunflower leaves. *Elsevier* (103): 93-99.

Serrada R., Aroca M., Roig S., Bravo A. y Gómez V., 2011. Impactos, vulnerabilidad y adaptación al cambio climático en el sector forestal. Ministerio del Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (Madrid). 126pp.

Society for Ecological Restoration International (SER), 2004. Principios de SER International sobre la restauración ecológica. Disponible en: [www.ser.org](http://www.ser.org) [Consultado: 10/06/2019].

Tang H., Hu Y., Yu W., Song L., Wu J., 2015. Growth, photosynthetic and physiological responses of *Torreya grandis* seedlings to varied light environments. *Trees* (29): 1011–1022.

Valladares F., 2008. Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante (Segunda edición). Páginas 511-532. Ministerio de Medio Ambiente. EGRAF, S. A., Madrid. ISBN: 978-84-8014-738-5.

Villar-Salvador P., 2016. Restoration of Spanish pine plantations: A main challenge for the 21st century. *REFORESTA* (1): 53-66.



## 10 Anexos:

**Anexo 1:** Significación estadística de las variables microambientales y fisiológicas.

Factor	Precipitación	
	F value	P value
Tratamiento (inter-sujeto)	3,128	<b>0,0368</b>

**Tabla 1.** Significación estadística de la variable microambiental precipitación según el tratamiento (factor inter-sujeto) de clara aplicado a la masa de pino.

Factor	Humedad del suelo (0-20cm)		Humedad del suelo (20-40cm)	
	F value	P value	F value	P value
Fecha (intra-sujeto)	240,499	<0,0001	157,454	<0,0001
Tratamiento (inter-sujeto)	2,652	0,0655	3,42	0,029
Fecha*Tratamiento	1,192	0,1444	1,453	0,012

**Tabla 2.** Significación estadística de la variable microambiental de humedad del suelo a una profundidad de 0-20 y de 20-40 centímetros.

Factor	Potencial hídrico		Fluorescencia	
	F value	P value	F value	P value
Tiempo	4,533	0,0018	55,193	0,0008
Tratamiento	15,768	0,0001	10,954	0,0001
Especie	0,0715	0,9751	15,080	0,0001
Tratamiento*Especie	3,009	0,0018	1,855	0,0559
Tiempo*Tratamiento	5,820	0,0001	11,132	0,0001
Tiempo*Especie	5,288	0,0014	1,291	0,2762
Tiempo*Tratamiento*Especie	0,727	0,6839	1,658	0,0958

**Tabla 3.** Significación estadística de las variables fisiológicas potencial hídrico y fluorescencia de la clorofila.

**Anexo II:** Medias y su error estándar de las variables microambientales y fisiológicas.

<b>HUMEDAD DE SUELO DE 0-20 cm</b>				
<b>Fecha</b>	<b>Control</b>	<b>CB-20</b>	<b>CB-35</b>	<b>SL-35</b>
25/07/2018	8,24 ± 1,6	18,81 ± 3,8	8,6 ± 1,71	14,09 ± 2,74
10/08/2018	5 ± 1,45	13,48 ± 3,43	6,53 ± 0,9	8,47 ± 2,4
23/08/2018	4,49 ± 1,24	11,64 ± 3,21	5,06 ± 0,77	6,91 ± 1,93
17/09/2018	5,76 ± 1,16	11,87 ± 2,64	5,49 ± 0,92	7,9 ± 1,55
27/09/2018	4,9 ± 1,09	10,39 ± 2,62	4,62 ± 0,77	6,82 ± 1,47
24/10/2018	17,24 ± 1,9	23,62 ± 3,51	16,29 ± 1,47	18,87 ± 2,12
12/11/2018	21,92 ± 2,29	28,82 ± 3,13	21,04 ± 1,61	23,28 ± 2,3
29/11/2018	17,03 ± 1,52	25,66 ± 3	19,94 ± 1,91	23,12 ± 2,49
21/12/2018	21,59 ± 2,3	26,92 ± 3,43	20,44 ± 2,01	23,37 ± 2,66
21/01/2019	19,2 ± 1,72	26,2 ± 3,18	18,87 ± 1,74	22,12 ± 2,57
20/02/2019	14,91 ± 1,8	23,36 ± 3,62	16,18 ± 1,5	18,86 ± 2,79
08/03/2019	15,36 ± 1,49	24,7 ± 3,39	16,57 ± 1,59	19,52 ± 2,59
22/03/2019	8,61 ± 1,45	18,5 ± 3,65	11,14 ± 1,28	14,52 ± 2,94
04/04/2019	7,56 ± 1,29	16,77 ± 3,41	10,74 ± 1,52	12,94 ± 2,42
01/05/2019	18,92 ± 2,01	25,5 ± 3,45	19,57 ± 1,71	21,08 ± 2,58
21/05/2019	9,49 ± 1,44	17,72 ± 3,46	11,17 ± 1,2	13,5 ± 2,61
05/06/2019	6,5 ± 1,19	12,99 ± 3,07	6,99 ± 0,77	9,62 ± 2,17
20/06/2019	5,01 ± 1,01	11,08 ± 2,86	5,14 ± 0,67	7,18 ± 1,66
10/07/2019	4,31 ± 0,96	9,33 ± 2,51	3,79 ± 0,69	5,81 ± 1,28
25/07/2019	4,31 ± 0,91	9,39 ± 2,65	3,21 ± 0,65	4,92 ± 1,09
16/08/2019	3,31 ± 1,04	7,84 ± 2,26	2,78 ± 0,66	4,23 ± 0,9
10/09/2019	5,69 ± 1,31	11,06 ± 2,79	4,44 ± 0,68	6,7 ± 1,18
27/09/2019	14,68 ± 1,77	20,91 ± 3,37	13,3 ± 1,32	16,38 ± 2,2
14/10/2019	8,27 ± 1,17	15,03 ± 2,99	7,19 ± 0,76	11,09 ± 1,75

**Tabla 4.** Medias ± error estándar para la variable humedad del suelo de 0-20 cm por fecha de medición. Fuente: elaboración propia a través del software R.

<b>HUMEDAD DE SUELO DE 30-40 cm</b>				
<b>Fecha</b>	<b>Control</b>	<b>CB-20</b>	<b>CB-35</b>	<b>SL-35</b>
25/07/2018	15,23 ± 1,99	24,57 ± 2,25	23,84 ± 2,06	23,56 ± 2,92
10/08/2018	11,23 ± 2,16	18,06 ± 3,27	19,46 ± 1,86	18,62 ± 3,1
23/08/2018	10 ± 2,18	15,59 ± 3,27	17,24 ± 1,93	16,42 ± 2,93
17/09/2018	9,8 ± 1,98	14,97 ± 3,03	17,14 ± 2,18	18,14 ± 2,72
27/09/2018	9,2 ± 1,94	17,79 ± 2,11	15,88 ± 2,16	16,51 ± 2,7
24/10/2018	25,2 ± 2,28	31,34 ± 1,71	29,94 ± 1,47	32,56 ± 2,54
12/11/2018	31,72 ± 2,89	42,16 ± 3,02	37,24 ± 2,68	36,96 ± 2,68
29/11/2018	28,87 ± 1,61	35,84 ± 2,85	38,09 ± 3,2	34,27 ± 2,54
21/12/2018	28,68 ± 1,54	35,46 ± 3,11	30,8 ± 2,97	34,62 ± 2,56

21/01/2019	29,46 ± 2,69	37,03 ± 2,69	34,63 ± 2,96	35,16 ± 2,64
20/02/2019	25,47 ± 1,67	31,06 ± 1,19	29,78 ± 1,09	29,21 ± 2,2
08/03/2019	26,61 ± 3,1	36,38 ± 2,59	32,2 ± 2,11	32,03 ± 2,18
22/03/2019	15,9 ± 2,39	28,31 ± 1,7	27,03 ± 1,35	25,28 ± 3,25
04/04/2019	13,5 ± 2,62	27,63 ± 1,77	27,8 ± 2,18	23,67 ± 3,44
01/05/2019	28,73 ± 1,6	34,29 ± 1,63	33,69 ± 1,57	31,55 ± 1,82
21/05/2019	19,38 ± 1,89	27,98 ± 1,61	26,43 ± 1,53	23,67 ± 3,1
05/06/2019	12,51 ± 2,41	24,03 ± 2,03	22,96 ± 1,38	22,63 ± 3,93
20/06/2019	9,88 ± 2,53	20,53 ± 2	19,18 ± 1,38	16,53 ± 2,77
10/07/2019	8,19 ± 2,53	17,12 ± 1,81	15,36 ± 1,52	13,98 ± 2,35
25/07/2019	7,87 ± 2,36	14,3 ± 1,97	13,96 ± 1,6	12,42 ± 2,27
16/08/2019	8,49 ± 2,41	13,56 ± 1,91	12,42 ± 1,63	11,43 ± 2,19
10/09/2019	11,54 ± 2,18	19,11 ± 1,94	16,68 ± 1,45	15,41 ± 2,53
27/09/2019	22,11 ± 2,67	30,1 ± 1,59	27,53 ± 1	26,83 ± 2,03
14/10/2019	13,7 ± 2,15	22,91 ± 1,91	19,47 ± 1,35	18,1 ± 2,89

**Tabla 5.** Medias ± error estándar para la variable humedad del suelo de 30-40 cm por fecha de medición. Fuente: elaboración propia a través del software R.

Fecha	Potencial hídrico	Fluorescencia
Julio	42,36 ± 0,85	0,73 ± 0,01
Septiembre	22,23 ± 0,69	0,81 ± 0,14

**Tabla 6.** Media ± Error Estándar de potencial hídrico y fluorescencia de la clorofila por tiempo (julio-septiembre). Fuente: elaborado con el software InfoStat

Tratamiento	Potencial hídrico	Fluorescencia
Control	39,14 ± 1,83	0,73 ± 0,01
CB-20	28,99 ± 1,40	0,79 ± 0,01
CB-35	32,02 ± 1,17	0,79 ± 0,01
SL-35	32,86 ± 1,63	0,76 ± 0,01

**Tabla 7.** Media ± Error Estándar de potencial hídrico y fluorescencia de la clorofila por tratamiento de clara. Fuente: elaborado con el software InfoStat.

Especie	Potencial hídrico	Fluorescencia
Arce	33,84 ± 1,83	0,75 ± 0,01
Encina	32,55 ± 1,55	0,81 ± 0,01
Rebollo	32,82 ± 1,36	0,80 ± 0,01
Serbal	32,93 ± 1,39	0,75 ± 0,01

**Tabla 8.** Media ± Error Estándar de potencial hídrico y fluorescencia de la clorofila por especie. Fuente: elaborado con el software InfoStat.

Tratamiento	Especie	Potencial hídrico	Fluorescencia
Control	Arce	38,65 ± 4,46	0,73 ± 0,01
CB-20	Arce	34,06 ± 3,71	0,77 ± 0,01
CB-35	Arce	33,21 ± 2,93	0,76 ± 0,01
SL-35	Arce	29,53 ± 3,55	0,73 ± 0,02
Control	Encina	38,88 ± 3,50	0,78 ± 0,02
CB-20	Encina	27,29 ± 2,34	0,82 ± 0,01
CB-35	Encina	27,06 ± 1,98	0,83 ± 0,00
SL-35	Encina	37,88 ± 3,50	0,78 ± 0,02
Control	Rebollo	42,89 ± 3,47	0,63 ± 0,09
CB-20	Rebollo	25,79 ± 2,51	0,83 ± 0,01
CB-35	Rebollo	35,42 ± 1,48	0,83 ± 0,01
SL-35	Rebollo	31,10 ± 2,65	0,81 ± 0,01
Control	Serbal	37,63 ± 3,18	0,72 ± 0,02
CB-20	Serbal	28,81 ± 2,22	0,76 ± 0,02
CB-35	Serbal	32,38 ± 2,52	0,75 ± 0,02
SL-35	Serbal	32,93 ± 2,99	0,75 ± 0,01

**Tabla 9.** Media ± Error Estándar de potencial hídrico y fluorescencia de la clorofila por tratamiento y por especie. Fuente: elaborado con el software InfoStat.

Tratamiento	Tiempo	Potencial hídrico	Fluorescencia
Control	Julio	51,37 ± 1,36	0,66 ± 0,02
CB-20	Julio	38,20 ± 1,70	0,76 ± 0,01
CB-35	Julio	39,14 ± 1,34	0,76 ± 0,01
SL-35	Julio	41,10 ± 1,67	0,73 ± 0,01
Control	Septiembre	23,51 ± 1,51	0,81 ± <0,01
CB-20	Septiembre	19,78 ± 1,17	0,81 ± <0,01
CB-35	Septiembre	24,90 ± 1,27	0,81 ± 0,01
SL-35	Septiembre	20,48 ± 1,56	0,80 ± 0,02

**Tabla 10.** Media ± Error Estándar de potencial hídrico y fluorescencia de la clorofila por tratamiento y por tiempo (julio-septiembre). Fuente: elaborado con el software InfoStat.

Tiempo	Especie	Potencial hídrico	Fluorescencia
Julio	Arce	45,22 ± 2,02	0,71 ± 0,01
Julio	Encina	43,15 ± 1,71	0,77 ± 0,01
Julio	Rebollo	39,01 ± 1,55	0,76 ± 0,02
Julio	Serbal	41,92 ± 1,34	0,70 ± 0,01
Septiembre	Arce	20,19 ± 1,31	0,78 ± 0,01
Septiembre	Encina	21,00 ± 1,08	0,84 ± <0,01
Septiembre	Rebollo	24,92 ± 1,63	0,84 ± <0,01
Septiembre	Serbal	23,14 ± 1,46	0,80 ± <0,01

**Tabla 11.** Media ± Error Estándar de potencial hídrico y fluorescencia de la clorofila por tiempo (julio-septiembre) y por especie. Fuente: elaborado con el software InfoStat.

Tiempo	Tratamiento	Especie	Potencial hídrico	Fluorescencia
Julio	Control	Arce	51,33 ± 4,08	0,66 ± 0,01
Julio	Control	Encina	54,17 ± 1,98	0,73 ± 0,02
Julio	Control	Rebollo	49,35 ± 2,20	0,54 ± 0,11
Julio	Control	Serbal	50,29 ± 1,95	0,66 ± 0,03
Julio	CB-20	Arce	47,88 ± 4,17	0,74 ± 0,01
Julio	CB-20	Encina	37,13 ± 1,68	0,79 ± 0,01
Julio	CB-20	Rebollo	31,38 ± 3,54	0,81 ± 0,01
Julio	CB-20	Serbal	36,42 ± 1,86	0,72 ± 0,03
Julio	CB-35	Arce	43,17 ± 3,51	0,73 ± 0,02
Julio	CB-35	Encina	32,79 ± 2,03	0,81 ± 0,01
Julio	CB-35	Rebollo	39,79 ± 1,80	0,81 ± 0,01
Julio	CB-35	Serbal	40,79 ± 2,34	0,70 ± 0,03
Julio	SL-35	Arce	38,50 ± 3,85	0,70 ± 0,03
Julio	SL-35	Encina	48,50 ± 3,52	0,74 ± 0,03
Julio	SL-35	Rebollo	37,25 ± 2,25	0,79 ± 0,01
Julio	SL-35	Serbal	40,17 ± 2,90	0,70 ± 0,01
Julio	Control	Arce	19,63 ± 3,07	0,79 ± <0,01
Septiembre	Control	Encina	23,58 ± 2,16	0,84 ± <0,01
Septiembre	Control	Rebollo	26,75 ± 5,02	0,85 ± <0,01
Septiembre	Control	Serbal	24,96 ± 3,07	0,80 ± <0,01
Septiembre	CB-20	Arce	20,25 ± 2,37	0,79 ± 0,01
Septiembre	CB-20	Encina	17,46 ± 1,55	0,84 ± <0,01
Septiembre	CB-20	Rebollo	20,21 ± 2,85	0,84 ± <0,01
Septiembre	CB-20	Serbal	21,21 ± 2,57	0,80 ± 0,01
Septiembre	CB-35	Arce	23,25 ± 2,37	0,78 ± 0,01
Septiembre	CB-35	Encina	21,33 ± 2,52	0,84 ± <0,01
Septiembre	CB-35	Rebollo	31,04 ± 1,56	0,84 ± <0,01
Septiembre	CB-35	Serbal	23,96 ± 2,86	0,79 ± 0,01
Septiembre	SL-35	Arce	16,06 ± 2,73	0,76 ± 0,02
Septiembre	SL-35	Encina	21,94 ± 1,94	0,83 ± 0,01
Septiembre	SL-35	Rebollo	21,88 ± 3,90	0,83 ± <0,01
Septiembre	SL-35	Serbal	22,06 ± 3,58	0,80 ± <0,01

**Tabla 12.** Media ± Error Estándar de potencial hídrico y fluorescencia de la clorofila por tiempo (julio-septiembre), por tratamiento y por especie. Fuente: elaborado con el software InfoStat.