

Diferencias de supervivencia y crecimiento en repoblaciones forestales entre plantas cultivadas en contenedor y a raíz desnuda.

MONZÓN LÓPEZ, S^{1,2}, ANDIVIA, E.¹, VILLAR-SALVADOR, P.²

¹ Departamento de Biodiversidad, Ecología y Evolución. Facultad de Ciencias Biológicas. Universidad Complutense de Madrid.

² Universidad de Alcalá. FORECO (Grupo de Ecología y Restauración Forestal), Departamento de Ciencias de la Vida.

Resumen.

El éxito inicial de los proyectos de restauración forestal depende de que el material forestal de reproducción utilizado sea de calidad y por tanto presente una elevada supervivencia y crecimiento tras su introducción en el campo. La planta cultivada en contenedor y la cultivada a raíz desnuda son los dos tipos fundamentales de plántulas que se usan en las repoblaciones forestales. En aquellos sitios donde ambos tipos de plantas son usadas, no existe consenso sobre cuál tiene más supervivencia y crecimiento, ni tampoco si las diferencias entre ambos tipos de planta pueden estar moduladas por factores externos. El objetivo de este estudio es determinar si existen diferencias significativas en supervivencia y crecimiento en campo entre ambos tipos de plantas y si factores, como el grupo taxonómico (angiospermas o gimnospermas), el tipo de suelo (forestal o agrícola) y la aridez del lugar de plantación, entre otros pueden modular las diferencias. Para ello, se ha realizado un meta-análisis de la literatura existente complementado con un conteo de votos, que incluyó un mayor número de estudios. La planta en contenedor presentó una supervivencia significativamente mayor que la planta a raíz desnuda (valor estimado de la d de Hedges \pm SE, $0,244 \pm 0,091$, $p=0,0077$). Esta diferencia también se observó en el crecimiento en altura, pero dependió del tamaño de las plantas en el momento de la plantación. La ventaja del contenedor en términos de supervivencia aumentó cuanto más grande fueron las plantas en contenedor y se redujo cuanto mayor fue la edad y tamaño de las plantas a raíz desnuda. La mayor supervivencia de las plantas en contenedor sólo se observó en las gimnospermas y cuando se hacen tratamientos de preparación del suelo. Tanto la aridez como el tipo de suelo y el control de la competencia de la vegetación espontánea no afectaron las diferencias de ambos tipos de planta. Este trabajo evidencia la ventaja de las plantas en contenedor sobre las de raíz desnuda en plantaciones forestales, modulada por el tamaño de la planta y su edad.

Palabras clave.

Aridez, calidad de planta, mortalidad, reforestación, vivero forestal.

1. Introducción.

Una gran parte de los proyectos de restauración forestal y de repoblación forestal con fines económicos conllevan la plantación de plántulas cultivadas en vivero. En estos casos, el éxito temprano de dichos proyectos pasa por maximizar la supervivencia y crecimiento post-plantación de los plántulas durante los primeros años (BOYER, 1988; YAMASHITA et al. 2016).

El *shock* post-trasplante es el principal problema al que deben enfrentarse los plántulas inmediatamente después su plantación. Se caracteriza por el estrés hídrico que sufren las plantas debido a la baja capacidad de absorber agua y nutrientes después de la plantación (KAUSHAL & AUSSENAC 1989; BURDETT, 1990). Para superarlo, los plántulas deben producir nuevas raíces que garanticen la conexión hidráulica de la planta con el suelo (HAASE et al. 2002). Los efectos

provocados por el *shock* post-trasplante pueden ser acumulativos en el tiempo, influyendo en el crecimiento y viabilidad de las plantas a largo plazo (CARLSON et al. 1980; PERNOT et al. 2019).

Las características funcionales de los plantones empleados en la repoblación forestal, especialmente del sistema radical, condicionan los efectos del *shock* post-trasplante. Algunos de los atributos morfológicos que predicen la capacidad de desarrollo de las plantas en campo son el tamaño de la planta y la ratio entre la biomasa de la parte aérea y la de la raíz. La utilización de plantas de elevada calidad puede acelerar la superación del *shock* post-trasplante, asegurando elevadas tasas de supervivencia (GROSSNICKLE 2012).

Las plantaciones forestales se pueden hacer con dos tipos fundamentales de plantas en función del método de cultivo en el vivero. Por un lado, las plantas cultivadas en contenedor (*container stock* en inglés) que se caracterizan por formar un cepellón, es decir, el conjunto del sistema radical trabado con el sustrato de cultivo fruto del cultivo en un volumen confinado. El cepellón reduce los efectos negativos del *shock* post-trasplante, porque almacena agua y nutrientes para la fase de arraigo y mantiene protegido el sistema radical del ambiente (BARNETT 1984, DAVIS & JACOBS 2004, SOUTH et al. 2005, GROSSNICKLE 2005). Por otro lado, las plantas cultivadas a raíz desnuda (*bareroot stock* en inglés) que se cultivan en el suelo como cualquier cultivo agronómico de forma que el sistema radical no tiene limitación física para el crecimiento, y no se forma cepellón. Por ello, para el traslado al lugar de repoblación, las raíces se extraen del suelo y pueden quedar más expuestas al ambiente. La ausencia de limitación física para el crecimiento implica que el sistema radical sufra menos deformaciones que las plantas en contenedor. Sin embargo, posteriormente la correcta plantación de las plantas a raíz desnuda es más complicada. Las plantas a raíz desnuda suelen presentar mayor tamaño que la planta en contenedor, debido a que son cultivadas a menores densidades, sin restricciones edáficas y a menudo por periodos de tiempo más prolongados (GROSSNICKLE & EL-KASSABY, 2015). Por último, otra ventaja de las plantas a raíz desnuda es que su coste es menor que la planta en contenedor.

Muchos estudios demuestran un mayor desempeño de la planta en contenedor que la de raíz desnuda, sobre todo en estaciones de baja calidad por limitaciones hídricas (POPE 1993; BARNETT & MCGILVRAY 1993; HAYWOOD & RARNETT 1994; MORRISEY et al. 2010). Sin embargo, otros estudios muestran que, en condiciones favorables, las plantas a raíz desnuda presentan tasas de supervivencia y crecimiento similares a las plantas en contenedor (HAYWOOD & RARNETT 1994; GROSSNICKLE & EL-KASSABY 2015; JAARATS et al. 2016). En aquellos lugares en los que ambos tipos de plantas son usadas, no existe un consenso sobre las condiciones de campo en las que la supervivencia y crecimiento de un tipo de planta es más óptimo que el del otro tipo (GROSSNICKLE & EL-KASSABY, 2015).

2. Objetivos.

El principal objetivo de este trabajo es comparar la supervivencia y crecimiento en campo de las plantas a raíz desnuda y en contenedor. Además, se evalúa si las diferencias entre ambos tipos de plantas están moduladas por la aridez del lugar de plantación, la edad y altura inicial de los plantones, si las especies son angiospermas o gimnospermas y si se han aplicado tratamientos de preparación el suelo y de control de la vegetación acompañante en la repoblación.

La hipótesis de partida es que las plantas en contenedor presentan una mayor supervivencia y crecimiento que las de raíz desnuda debido a las características del sistema radical y la presencia del cepellón, que permiten paliar el *shock* post-trasplante. En cuanto a los moduladores, hipotetizamos que la ventaja de la planta en contenedor será mayor cuanto más desfavorables sean las condiciones de plantación. Por lo tanto, se espera que la planta a raíz desnuda se desarrolle de forma similar a la planta en contenedor en ambientes sin estrés hídrico, en suelos agrícolas, cuando se realiza una preparación del suelo y se controla la competencia de la vegetación acompañante. Finalmente, pensamos que las diferencias entre

ambos tipos de plantas serán más intensas en las angiospermas que en las gimnospermas, ya que éstas últimas tienen tasas de transpiración inferiores a las angiospermas debido a las características de su xilema (CHOAT et al. 2012; O´BRIEN et al. 2017). Para contestar a estas preguntas, se llevó a cabo un meta-análisis de la literatura existente, complementado con un conteo de votos, que incluyó un mayor número de estudios.

3. Metodología.

3.1. Búsqueda bibliográfica y criterios de selección de artículos.

En diciembre de 2019 se realizó una búsqueda exhaustiva de la literatura científica y técnica en relación con la supervivencia y crecimiento en condiciones de campo de ambos tipos de plantas. Las bases de datos consultadas fueron: Web of Science, TreeSearch (base de datos del Servicio Forestal de Estados Unidos, www.fs.usda.gov/), Google Scholar y el Servicio Forestal Canadiense (www.cfs.nrcan.gc.ca/publications). Adicionalmente, se utilizaron las referencias de las Tablas 4 y 6 de GROSSNICKLE & EL-KASSABY (2015). El comando de búsqueda utilizado fue: “container” AND (“bareroot” OR “bare root” OR bare-root). De la búsqueda bibliográfica, se obtuvieron un total de 570 artículos

A fin de seleccionar exclusivamente aquellas relevantes para el tema de estudio, a continuación comenzó una fase de cribado de las referencias en base a unos criterios de inclusión, por medio de un procedimiento de eliminación por fases (LEVERKUS et al. 2015) (Figura 1). Los criterios de inclusión fueron los siguientes: que se compararan ambos tipos de plantas, que se midiera el crecimiento y/o supervivencia de los pies plantados y que la plantación se realizara en condiciones de campo (se excluyen las comparaciones entre plantas realizadas en vivero). En total, hubo 125 artículos que cumplieron los distintos criterios de inclusión. Estos artículos fueron leídos en su totalidad para realizar la extracción de los datos de interés. En caso de que alguno de los artículos resultara no ser útil para nuestro estudio, sería descartado. En concreto, de los 125 artículos, 39 tuvieron que ser descartados.

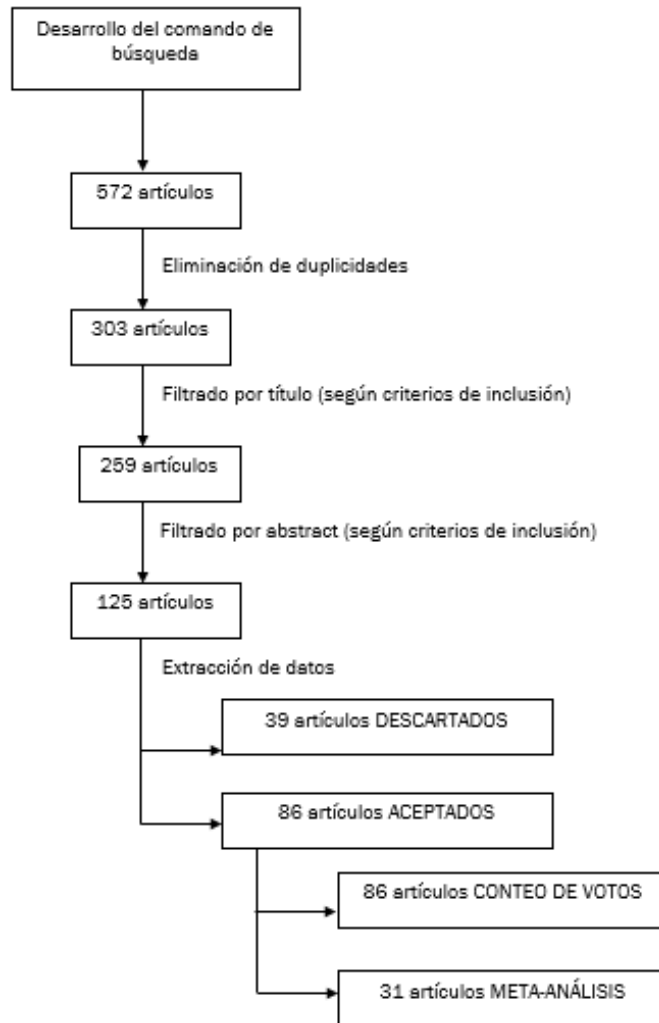


Figura 1. Esquema del proceso de obtención de las referencias utilizadas en el meta-análisis.

3.2. Extracción y estructura de la base de datos.

La extracción de los datos se organizó en base a casos de estudio, de manera que cada combinación posible de los factores a estudiar daba lugar a un caso independiente de estudio. Por ejemplo, para un artículo en el que se comparan ambos tipos de plantas de una única especie (*Pinus sylvestris*) en zonas con usos del suelo diferentes (uso forestal y uso agrícola), se daría lugar a dos casos de estudio: comparación de ambos tipos de plantas de *P. sylvestris* en suelo agrícola (1) y en suelo forestal (2). Por tanto, de un mismo artículo podía obtenerse más de un caso de estudio.

En primer lugar, se extrajeron los datos relacionados con resultados estadísticos, imprescindibles para realizar el meta-análisis. Estos datos son fundamentales para calcular el tamaño del efecto (*effect size* en inglés). Se extrajeron los datos estadísticos de las siguientes variables: porcentaje de supervivencia, crecimiento absoluto en altura y diámetro tras la plantación en campo. Para cada variable, se recogió el valor medio, número de réplicas y desviación estándar de cada grupo de plantas. Cuando estos datos venían representados en forma de figuras, se utilizó el programa *ImageJ* (SCHNEIDER et al. 2012) para extraer la información cuantitativa.

Además, se recogieron otros datos como: identidad de la especie, grupo taxonómico, edad de las plantas (en años), diámetro en el cuello de la raíz y altura de las plantas en el momento de la plantación, fecha de plantación, coordenadas del lugar de plantación, uso del suelo, preparación del suelo (realizada o no), control de la vegetación acompañante (realizada o no) y fecha de medición de la supervivencia o crecimiento. Cuando las coordenadas no se incluían, estas se

aproximaron ubicando la información sobre el lugar de plantación en *Google Maps*. Con las coordenadas, se obtuvo el índice de aridez (UNESCO 1997) para cada lugar de plantación. El índice de aridez se obtuvo de la base de datos *Global Aridity Index Geospatial Database* (TRABUCCO & ZOMER 2018), calculada a partir de los datos de WorldClim 2.0 (FICK & HIJMANS 2017) para los años 1970-2000 a una resolución de 30 arc-sec. En cuanto al uso del suelo, se determinó que sería de tipo forestal en zonas de bosques talados o quemados o zonas restauradas tras actividad minera, ya que se trata de zonas con menor calidad de suelo. El uso del suelo se clasificaría como de tipo agrícola en pastizales, zonas agrícolas o vegas, ya que es probable que estas zonas fueran cultivadas anteriormente y su calidad mayor que los suelos forestales.

De los 86 artículos válidos para nuestro estudio, todos se utilizaron en el conteo de votos, mientras que solo 31 de éstos pudieron utilizarse para el meta-análisis, pues la mayoría (60%) carecía de datos estadísticos que impedía el cálculo del tamaño del efecto. Estos 31 estudios dieron lugar a 267 casos de estudio: 219 para la supervivencia, 247 para el crecimiento en altura y 59 para el crecimiento en diámetro.

3.3. Conteo de votos.

El conteo de votos se realizó como refuerzo del meta-análisis, a pesar de sus conocidas limitaciones (KORICHEVA & GUREVITCH 2013, ANDIVIA et al. 2019). La extracción de datos también se realizó en base a casos de estudio. El voto fue considerado positivo cuando la supervivencia o el crecimiento del contenedor era > que la raíz desnuda. Fue considerado negativo cuando la supervivencia o el crecimiento del contenedor era < que la raíz desnuda. Finalmente, cuando el contenedor y la raíz desnuda daban valores similares el voto fue neutro. En total, se obtuvieron 415 casos de estudio.

Para el análisis estadístico del conteo de votos, se utilizó la prueba χ^2 en el programa STATISTICA. Además, mediante tablas de contingencia 2x2 se realizó un análisis por separado para cada uno de los factores que pudieran influenciar el resultado de la comparación entre ambos tipos de planta (grupo taxonómico, uso del suelo, preparación del suelo y control de la vegetación acompañante). En aquellos casos en los que el número de votos, para una variable respuesta o modulador, presentaba un valor observado ≤ 5 , se utilizó la corrección de Yates para calcular la χ^2 .

3.4. Meta-análisis.

Para cada una de las variables de interés (supervivencia, crecimiento en altura y crecimiento en campo) se calculó el tamaño del efecto (*effect size*) mediante la *d* de Hedge (HEDGES & OLKIN, 1985):

$$d = \frac{\bar{Y}_c - \bar{Y}_{br}}{\sqrt{\frac{(n_c - 1)S_c^2 + (n_{br} - 1)S_{br}^2}{n_c + n_{br} - 2}}} \left(1 - \frac{3}{4(n_c + n_{br} - 2) - 1}\right)$$

con varianza:

$$v_d = \frac{n_c + n_{br}}{n_c n_{br}} + \frac{d^2}{2(n_c + n_{br})}$$

donde \bar{Y} , S y n son el promedio de la variable de interés, la desviación estándar y el número de muestras en plantas de contenedor (c) y a raíz desnuda (br). De manera análoga al conteo de votos, valores positivos de d indican que las plantas de contenedor se desarrollan mejor que las de raíz desnuda.

Para el análisis estadístico del meta-análisis, se utilizaron modelos aleatorios en los que se controló la falta de independencia entre los casos de estudios procedentes de un mismo artículo, incluyendo la identidad del artículo como efecto aleatorio en los modelos (MENGERSEN et al. 2013).

En primer lugar, para evaluar el efecto general sobre la supervivencia ($n=219$) y crecimiento en altura ($n=247$) y diámetro ($n=59$) de ambos grupos de plantas se ajustó un modelo nulo, siendo el valor del intercepto el efecto general. Si los intervalos de confianza al 95% de dicho intercepto no solapaban el cero, se concluyó que existía un efecto significativo del tipo de planta sobre las variables estudiadas. Para evaluar la posible existencia de sesgo de publicación, ajustamos estos mismos modelos, pero incluyendo como efecto fijo la varianza asociada al tamaño del efecto. Este método es una extensión para modelos aleatorios de meta-análisis del ampliamente utilizado test de Egger (HIGGINS & GREEN 2011). En caso de existir sesgo de publicación, se calculó el número de Rosenberg (ROSENBERG 2005) que indica el número de estudios necesarios para cambiar el efecto global observado. Además, también se comprobó si había un sesgo en los resultados asociado al año de publicación incorporando en el modelo el año de publicación como efecto fijo (GIBERT et al. 2016).

Una vez comprobado el efecto general, se evaluó si distintas variables relacionadas con el lugar de plantación, las especies plantadas o el tamaño y edad de las plantas modulaban este efecto. Este segundo grupo de modelos no se aplicó sobre el crecimiento en diámetro por falta de poder estadístico (59 observaciones). Debido a que no todos los artículos contenían información sobre estas variables, se ajustaron dos grupos de modelos para maximizar el número de observaciones. En el primer grupo de modelos se evaluó el efecto del grupo taxonómico (angiospermas vs. gimnospermas), la existencia de preparación del suelo (sí vs. no) y el índice de aridez sobre el tamaño del efecto de la supervivencia ($n=219$) y el crecimiento en altura ($n=245$). El efecto del tipo de uso del suelo (agrícola vs. forestal) no se pudo evaluar por redundancia con la preparación del suelo, ya que en nuestra base de datos todos los terrenos agrícolas se realizaron labores de preparación del terreno. En el segundo grupo de modelos se evaluó el efecto de la edad de las plantas a raíz desnuda y de la altura en el momento de la plantación de las plantas a raíz desnuda y en contenedor sobre el tamaño del efecto de la supervivencia ($n=100$) y el crecimiento en altura ($n=112$). En este último caso, no se evaluó el efecto de la edad de la planta en contenedor, ya que la mayor parte de las plantas de contenedor se cultivaron a una savia.

Para evaluar el efecto de las distintas variables, se ajustaron todos los modelos posibles y se seleccionó el más parsimonioso mediante el Criterio de Información de Akaike (AIC) usando un umbral de dos unidades (BURHAM & ANDERSON 2002). Estos análisis se realizaron en R v4.0.2. (R CORE TEAM 2020) mediante el paquete “metafor” (VIECHTBAUER 2010).

4. Resultados.

4.1 Conteo de votos.

Para la supervivencia, un 40% de los casos presentaron un voto positivo ($C > BR$), frente a un 11% con votos negativos ($C < BR$). El resto, un 49%, fueron votos neutros (Tabla 1). La diferencia entre la frecuencia de casos observados y esperados fue altamente significativa (Tabla 1). Cuando nos centramos en la frecuencia de casos en los que hubo diferencias significativas entre ambos tipos de planta (i.e. $C > BR$ y $C < BR$) la mayor frecuencia de votos positivos ($C > BR$) que de negativos ($C < BR$) fue altamente significativa ($n=181$; $\chi^2_{1,0.05}=30,56$; $p < 0,0001$). En síntesis, la planta en contenedor tiene significativamente mayor supervivencia en campo que la planta a raíz desnuda.

En cuanto al crecimiento en altura, la diferencia entre la frecuencia de casos observados y esperados para los tres posibles resultados del conteo de votos fue significativa (Figura 2B).

En más de la mitad de los casos (57%) se registraron diferencias significativas entre ambos tipos de plantas. Para estos casos, la frecuencia de votos a favor del contenedor, sin embargo, no fue significativamente distinta de la frecuencia en contra del contenedor ($n=221$; $\chi^2_{1,0.05}=0.38$; $p=0,54$).

Finalmente, la proporción de casos con votos positivos, negativos y neutros para el crecimiento en diámetro fue parecida, no existiendo diferencias significativas entre las frecuencias observadas y esperadas para los tres posibles resultados del conteo de votos (Tabla 1).

Tabla 1. Proporción (%) observada de casos para los tres posibles resultados del conteo de votos para la variable supervivencia, crecimiento en altura y crecimiento en diámetro. Los posibles resultados son $C>BR$ =la planta en contenedor sobrevive significativamente más que la planta a raíz desnuda, $C<BR$ =lo contrario del caso anterior, y $C=BR$ = no hay diferencias significativas entre ambos tipos de planta.

	C > BR	C < BR	C = BR	Resultados estadísticos
Supervivencia	40	11	49	$n=354$; $c^2_{2; 0,05}= 81,7$; $p<0,001$
Crecimiento en altura	30	27	43	$n=388$; $c^2_{2; 0,05}= 17,1$; $p<0,001$
Crecimiento en diámetro	35	29	36	$n=69$; $c^2_{2; 0,05}= 0,61$; $p=0,74$

Con respecto al grupo taxonómico (angiospermas vs. gimnospermas), se detectó una asociación significativa con el tipo de voto ($C>BR$ y $C<BR$) para el crecimiento diametral. En concreto, en las gimnospermas la planta en contenedor creció significativamente más en un mayor número de casos que la planta a raíz desnuda mientras que en las angiospermas se observó lo contrario (Figura 2C). Para el resto de las variables, no se detectaron asociaciones significativas. Para el tipo de suelo en el que se estableció la plantación (forestal o agrícola) no se detectó ninguna asociación significativa con las variables de estudio. En cuanto a la preparación del suelo (realizada o no), solo se encontró una asociación significativa para la supervivencia, siendo la planta en contenedor más favorable que la planta a raíz desnuda, especialmente con preparación del suelo (Figura 2G). Por último, con relación al control de la vegetación acompañante (realizado o no), se encontraron asociaciones significativas para todas las variables de estudio. Así, la planta en contenedor tuvo mejor supervivencia que la planta a raíz desnuda, especialmente cuando no se controló la vegetación acompañante (Figura 2J). En cambio, para el crecimiento en altura y diámetro (Figura 2K-L) la ventaja del contenedor sólo se observó cuando sí hubo control de la vegetación acompañante.

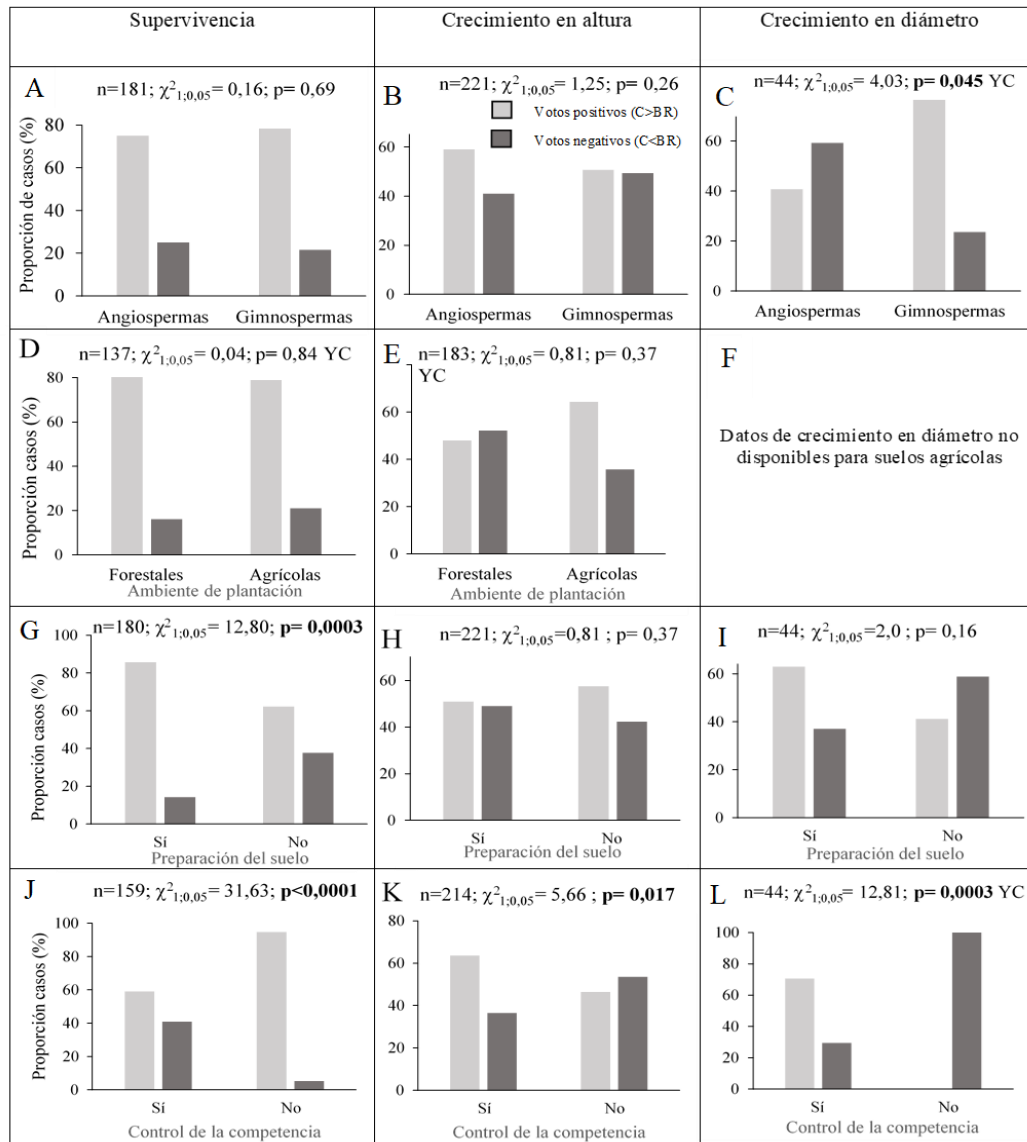


Figura 2. Resultados obtenidos mediante el análisis del conteo de votos para los moduladores (A-C) grupo taxonómico, (D-F) tipo de uso del suelo, (G-I) preparación del suelo y (J-L) control de la vegetación acompañante para las variables de estudio. (Cultivo en contenedor (C), cultivo a raíz desnuda (BR, del inglés bare-root).

4.2 Meta-análisis.

La comparación de la supervivencia en campo entre las plantas en contenedor y a raíz desnuda mostró un tamaño de efecto global positivo y estadísticamente significativo (d Hedges estimado \pm SE, $0,244 \pm 0,091$, $p=0,008$), indicando una mayor supervivencia de las plantas en contenedor frente a las de raíz desnuda. No se ha detectado sesgo de publicación para la supervivencia ($p=0,403$).

Los resultados del crecimiento en altura revelaron que no existieron diferencias significativas del tamaño del efecto ($0,032 \pm 0,230$, $p=0,888$) entre ambos tipos de planta. El test de Egger mostró sesgo de publicación (pendiente estimada \pm SE, $-0,0047 \pm 0,0022$, $p=0,0297$). Sin embargo, el número de Rosenberg fue elevado (16,690 estudios, $p < 0,001$) y sugiere que este sesgo no afectó a los resultados. El año de publicación de los artículos mostró una tendencia positiva y significativa en el número de estudio que mostraban un mejor

desempeño de las plantas en contenedor con el tiempo (0.0727 ± 0.0324 , $p=0,0336$). Esto puede ser una consecuencia de la mejora de la tecnología de cultivo en plantas en contenedor. Por su parte, el crecimiento en diámetro en condiciones de campo no mostró diferencias significativas entre las plantas en contenedor y a raíz desnuda (-2.599 ± 2.312 , $p=0,260$). No se ha detectado sesgo de publicación para esta variable ($p=0,987$). El año de publicación de los artículos analizados tampoco tuvo un efecto significativo en los resultados ($p=0,650$).

El modelo más parsimonioso para evaluar el efecto del grupo taxonómico, la preparación del suelo y la aridez sobre la diferencia de supervivencia de ambos grupos de planta fue el modelo nulo, lo que indica que ninguna de estas variables modula el efecto general observado de mayor supervivencia de la planta en contenedor sobre la planta a raíz desnuda. No obstante, el tamaño del efecto en las gimnospermas y cuando se realizaron labores de preparación del terreno fue significativamente positivo, indicando un mejor desempeño de las plantas en contenedor en estos casos (Tabla 2). En el caso de las angiospermas, y cuando no hubo preparación del terreno, las diferencias entre grupos de plantas no fueron significativas. En el caso del crecimiento en altura, el modelo más parsimonioso para estos moduladores incluyó el efecto del grupo taxonómico. Así, las angiospermas mostraron un mayor crecimiento en altura cuando fueron cultivadas en contenedor que a raíz desnuda en comparación con las gimnospermas (Tabla 2).

Tabla 2. Efecto de distintos moduladores sobre el tamaño del efecto en la supervivencia y el crecimiento en altura. Valores positivos de la estima del tamaño del efecto indican que las plantas de contenedor se desarrollan mejor que las de raíz desnuda. IC=Intervalo de confianza al 95%.

	Supervivencia			Crecimiento en altura		
	Tamaño del efecto	IC	p-valor	Tamaño del efecto	IC	p-valor
Angiospermas	0,092	0,19	0,62	0,747	0,40	0,06
Gimnospermas	0,291	0,10	0,005	-0,272	0,25	0,28
Preparación del suelo: Sí	0,316	0,09	0,000	0,072	0,23	0,75
Preparación del suelo: No	-0,056	0,17	0,75	-0,364	0,35	0,29

El modelo más parsimonioso para evaluar el efecto de la edad de la planta a raíz desnuda y la altura de ambos tipos de planta en la supervivencia incluyó los tres moduladores estudiados. La ventaja de las plantas en contenedor frente a las cultivadas a raíz desnuda disminuyó con la edad (pendiente de la relación entre la d Hedges y la edad: $m=-0,189$; $IC=0,090$; $p=0,036$) y la altura de la planta a raíz desnuda (pendiente de la relación entre la d Hedges y la altura inicial: $m=-0,636$; $IC=0,099$; $p<0,001$). En cambio la ventaja de las plantas en contenedor frente a las de raíz desnuda en términos de supervivencia, se incrementó con la altura inicial de la planta en contenedor ($m=0,479$; $IC=0,138$; $p=0,0005$).

Para el crecimiento en altura, el modelo más parsimonioso incluyó el efecto de la altura inicial de ambos tipos de plantas. La ventaja de las plantas en contenedor sobre las cultivadas a raíz desnuda aumentó con la altura de las plantas en contenedor (pendiente de la relación entre la d Hedges y la altura inicial $m=0,595$; $IC=0,155$; $p=0,0001$) y disminuyó con la altura de las plantas a raíz desnuda ($m=-0,672$; $IC=0,112$; $p=1,817$).

5. Discusión.

Los resultados obtenidos mediante ambas aproximaciones evidencian que en general las plantas en contenedor presentan una mayor supervivencia que las plantas a raíz desnuda. Estos resultados coinciden con las tendencias mostradas por varios autores (McDONALD 1991;

BARNETT & MCGILVRAY, 1993; SOUTH et al. 2005; DELIGOZ 2012). Además, el grupo taxonómico y en especial la calidad de planta, medida por su tamaño, modularon esta diferencia entre ambos tipos de planta. La diferencia de supervivencia entre los tipos de plantas es especialmente patente en las gimnospermas, mientras que el mayor desempeño de las plantas en contenedor con respecto a las de raíz desnuda se maximiza cuando se realiza algún tipo de preparación del suelo, cuanto más joven y pequeña sea la planta a raíz desnuda y cuanto más grande sea la planta en contenedor. Una limitación de nuestro estudio es que la comparación de las plantas entre sí se ha visto dificultada por el uso de plantas de distintas edades dentro del mismo estudio.

La mayor supervivencia de las plantas en contenedor podría radicar en la protección física de las raíces en el momento de la plantación, y en la formación de un cepellón de raíces fibroso y denso que almacena agua y nutrientes (DAVIS & JACOBS 2014; GROSSNICKLE & EL-KASSABY 2015). Estas particularidades de las plantas en contenedor pueden reducir los efectos del shock del trasplante (SOUTH 1986). Algunos autores han afirmado que la ventaja del contenedor sobre la raíz desnuda se manifiesta particularmente en condiciones de limitación hídrica (BARNETT & MCGILVRAY, 1993) siendo el desempeño similar bajo condiciones de buena disponibilidad hídrica (BARNETT & MCGILVRAY, 1993; JAARATS et al. 2016). Nuestros resultados sobre el efecto de la aridez no avalan estas ideas, tanto para la supervivencia como el crecimiento. Es posible que la falta de un efecto de la aridez sea debido a que nuestra base de datos tiene una escasa variabilidad climática entre estudios. En concreto, el 75% de los casos de estudio corresponden a regiones de clima húmedo y el resto a regiones de clima subhúmedo de Europa central y América del Norte. En nuestro estudio, la ventaja de la planta en contenedor se ha mantenido en las zonas más húmedas porque quizás las plantaciones forestales en estas zonas se han realizado sobre suelos de pobre desarrollo, en los que el cepellón confiere las ventajas comentadas. La escasez de estudios en zonas secas es debido al uso preponderante del contenedor en dichas zonas.

Un resultado muy interesante del trabajo es que la diferencia de supervivencia entre ambos tipos de planta está condicionada por la altura de las plantas en el momento de la plantación. Estos resultados sugieren que las características funcionales de las plantas en el momento de la plantación, su calidad, son claves en las diferencias entre las plantas en contenedor y las de raíz desnuda. Una mayor altura de las plantas confiere una mayor capacidad competitiva y de desarrollo bajo condiciones de estrés (NAVARRO et al. 2006, ROSNER & ROSE 2006; HYTÖNEN & JYLHÄ 2008, ANDIVIA et al. 2021). A mayor tamaño, las plantas aumentan su capacidad de producir nuevas raíces y almacenar reservas que pueden usar en periodos limitantes para las plantas (CUESTA et al. 2010; VILLAR-SALVADOR et al. 2012).

Se ha detectado que el incremento en la edad de la planta a raíz desnuda reduce la ventaja del contenedor en términos de supervivencia. El efecto de la edad no puede explicarse por un simple aumento del tamaño de la planta relacionada con la edad, ya que la correlación entre la edad y el tamaño de la planta a raíz desnuda es muy baja ($r=0,3$). Una posible explicación es que las plantas más viejas sean más resistentes a factores de estrés que las plantas jóvenes, lo que les permite sufrir menos el shock del trasplante (HAASE & ROSE, 1993).

No hemos encontrado un respaldo claro a nuestra hipótesis de que las diferencias entre ambos tipos de plantas fueran más intensas en las angiospermas que en las gimnospermas. Por el contrario, la ventaja en supervivencia de las plantas en contenedor favorece más a las gimnospermas. Estos resultados deben tomarse con cautela, ya que la base de datos analizada en este estudio tiene una representación pequeña de angiospermas (solo un 18% de los casos) y fuertemente sesgada hacia dos géneros, *Quercus* spp. (55% de los casos de angiospermas) y *Populus* spp.

La preparación del suelo favorece la supervivencia de las plantas en contenedor sobre las de raíz desnuda, pero no el crecimiento. La preparación del suelo facilita la captación e infiltración del agua en el suelo e incrementa la disponibilidad de nutrientes y la aireación del suelo, factores que todos ellos disminuyen los efectos del *shock* post-trasplante (LÖF et al. 2012). Además, muchos de estos tratamientos eliminan a la vegetación establecida espontáneamente en la zona

a reforestar, reduciendo su competencia, lo que puede beneficiar a la plantación especialmente durante los primeros años (NILSSON & ÖRLANDER 2003).

Es importante señalar la importancia de continuar con esta línea de estudio, especialmente en países del hemisferio sur y zonas tropicales, donde los estudios son escasos, pero donde se encuentran la mayoría de las oportunidades de restauración forestal (LAESTADIUS et al. 2011).

6. Conclusiones.

La conclusión principal que deriva de este estudio es que existe una clara tendencia general por la cual las plantas en contenedor tienen un mejor desarrollo en condiciones de campo, en comparación con la planta a raíz desnuda. Este efecto positivo es claramente evidente para la supervivencia y las gimnospermas, pero mucho menos claro para el crecimiento. Además, la ventaja de las plantas en contenedor se reduce cuanto mayor altura y edad tengan las plantas a raíz desnuda. En cambio, la ventaja de las plantas en contenedor se maximiza cuanto más grandes son estas plantas. Por ello, es importante evitar las plantas pequeñas en los proyectos de reforestación independientemente del método de cultivo de las mismas. La preparación del suelo aumenta la ventaja de las plantas en contenedor sobre la supervivencia. En cambio en el rango de variación de este estudio, la aridez no ha condicionado la ventaja de las plantas en contenedor.

7. Agradecimientos.

El estudio ha sido parcialmente financiado por la red REMEDINAL de la Comunidad de Madrid (S2018/EMT-4338).

8. Bibliografía. (1606 palabras a día 20/01/2022).

ANDIVIA, E., VILLAR-SALVADOR, P., OLIET, J. A., PUÉRTOLAS, J. and DUMROESE, R. K.; 2019. How can my research paper be useful for future meta-analyses on forest restoration plantations? *New For.*, 50(2), 255-266.

ANDIVIA, E., VILLAR-SALVADOR, P., OLIET, J., PUÉRTOLAS, J., DUMROESE, R.K., IVETIC, V., MOLINA-VEGENGAS, R., ARELLANO, E., LI, G., OVALLE, J.; 2021. Climate and species stress resistance modulate the higher survival of large seedlings in forest restoration worldwide. *Ecological Applications* e2394.

BARNETT, J.P.; 1984. Relating seedling physiology to survival and growth in container-grown southern pines. *Seedling physiology and reforestation success*. Springer, pp. 157-176.

BARNETT, J.P. and MCGILVRAY, J.M.; 1993. Performance of Container and Bareroot Loblolly Pine Seedlings on Bottomlands in South Carolina. *South. J. Appl. For.*, 17(2), pp. 80-83.

BOYER, W.D.; 1988. Effects of site preparation and release on the survival and growth of planted bareroot and container-grown longleaf pine. *Georgia Forestry Commission, Georgia Forest Research Paper*, pp. 1-7.

- BURDETT, A.N.; 1990. Physiological processes in plantation establishment and the development of specifications for voforest planting stock. *Can. J. of For. Res.* 20, pp. 415-427.
- BURNHAM, K. P., and ANDERSON, D. R.; 2002. A practical information-theoretic approach. Model selection and multimodel inference. Springer. 185. New York.
- CARLSON, W.C., PREISIG, C.L. and PROMNITZ, L.C.; 1980. Comparative root system morphologies of seeded-in-place, bareroot, and container-cultured plug Sitka spruce seedlings after outplanting. *Can. J. of For. Res.* 10(3), pp. 250-256.
- CASTAÑEDA, N. P. and REYES, B. J.; 2014. Riesgos Naturales y Cambio Climático. Capítulo 6. Cambio climático e incendios de 5ª generación. In: Colegio de Ingenieros de Montes.
- CHOAT, B., JANSEN, S., BRODRIBB, T.J., COCHARD, H., DELZON, S., BHASKAR, R., BUCCI, S.J., FEILD, T.S., GLEASON, S.M., HACKE, U.G., JACOBSEN, A.L., LENS, F., MAHERALI, H., MARTÍNEZ-VILALTA, J., MAYR, S., MENCUCCINI, M., MITCHELL, P.J., NARDINI, A., PITTERMANN, J., PRATT, R.B., SPERRY, J.S., WESTOBY, M., WRIGHT, I.J. and ZANNE, A.E.; 2012. Global convergence in the vulnerability of forests to drought. *Nature*. 491(7426), pp. 752-755.
- CUESTA, B., VEGA, J., VILLAR-SALVADOR, P., and REY-BENAYAS, J.M.; 2010. Root growth dynamics of Aleppo pine (*Pinus halepensis* Mill.) seedlings in relation to shoot elongation, plant size and tissue nitrogen concentration. *Trees - Struct Funct* 24:899–908.
- CROUZEILLES, R., CURRAN, M., FERREIRA, M.S., LINDENMAYER, D.B., GRELE, C.E.V. and REY BENAYAS, J.M.; 2016. A global meta-analysis on the ecological drivers of forest restoration success. *Nature communications*, 7(1), pp. 11666.
- DAVIS, A.S. and JACOBS, D.F.; 2004. First-year survival of northern red oak seedlings planted on former surface coal mines in Indiana. Proceedings America Society of Mining and Reclamation. *ASMR*, pp.480-503.
- DELIGOZ, A.; 2012. Morphological and physiological differences between bareroot and container *Juniperus excelsa* seedlings. *Turk. J. Agric. For.*, 36(5), pp. 619-628.
- DESPREZ-LOUSTAU, M., MARÇAIS, B., NAGELEISEN, L., PIOU, D. and VANNINI, A.; 2006. Interactive effects of drought and pathogens in forest trees. *Ann. For. Sci.*, 63(6), pp. 597-612.
- FICK, S. E., and HIJMANS, R. J.; 2017. WorldClim 2: new 1- km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *In. J. Climatol.*, 37(12), 4302-4315.
- FLORESS, K., HUFF, E.S., SNYDER, S.A., KOSHOLLEK, A., BUTLER, S. and ALLRED, S.B.; 2019. Factors associated with family forest owner actions: A vote-count meta-analysis. *Landsc. Urban Plan.*, 188, pp. 19-29.
- GIBERT, A., GRAY, E. F., WESTOBY, M., WRIGHT, I. J., and FALSTER, D. S.; 2016. On the link between functional traits and growth rate: meta- analysis shows effects change with plant size, as predicted. *J. Ecol.*, 104(5), 1488-1503.

- GROSSNICKLE, S.; 2005. Importance of root growth in overcoming planting stress. *New For.*, **30**(2), pp. 273-294.
- GROSSNICKLE, S.C.; 2012. Why seedlings survive: influence of plant attributes. *New forests*, **43**(5-6), pp. 711-738.
- GROSSNICKLE, S.C. and EL-KASSABY, Y.; 2016. Bareroot versus container stocktypes: a performance comparison. *New For.*, **47**(1), pp. 1-51.
- HAASE, D.L. and ROSE, R.; 1993. Soil moisture stress induces transplant shock in stored and unstored 2 + 0 Douglas-Fir seedlings of varying root volumes. *For. Sci.*, **39**(2), pp. 275-294.
- HAASE, D.L., TROBAUGH, J. and ROSE, R.; 2002. Douglas-fir container stock grown with fertilizera amended media: some preliminary results.
- HAYWOOD, J.D. and RARNETT, J.P.; 1994. Comparing Methods of Artificially Regenerating Loblolly and Slash Pines: Container Planting, Bareroot Planting, and Spot Seeding. *Tree Planter´s Notes*, vol. 45, no. 2, pp. 63-67.
- HEDGES, L. V., and OLKIN, L.; 1985. Statistical methods for meta-analysis. Orlando, Florida: 70 Academic Press.
- HIGGINS, J., and GREEN, S.; 2011. Cochrane Handbook for Systematic Reviews of Interventions version 5.1.0. UK: The Cochrane Collaboration. Chichester: John Wiley & Sons.
- HYTÖNEN, J. and JYLHÄ, P.; 2008. Fifteen-year response of weed control intensity and seedling type on Norway spruce survival and growth on arable land. *Silva Fennica*, **42**(3).
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2020. Climate ch
- JAARATS, A., TULLUS, A. and SEEMEN, H.; 2016. Growth and Survival of Bareroot and Container Plants of *Pinus sylvestris* and *Picea abies* During Eight Years in Hemiboreal Estonia. *Bal. For.*, **22**(2), pp. 365-374.
- KAUSHAL, P. and AUSSÉNAC, G.; 1989. Transplanting shock in Corsican pine and Cedar of Atlas seedlings: Internal water deficits, growth and root regeneration. *For. Ecol. Manag.*, **27**(1), pp. 29-40.
- KORICHEVA, J. and GUREVITCH, J.; 2013. Chapter 1. Place of Meta-analysis among Other Methods of Research Synthesis. In: J. KORICHEVA, J. GUREVITCH and K. MENGERSEN, eds, *Handbook of Meta analysis in Ecology and Evolution*. Oxford: Princeton University Press, pp. 3-13.
- LAESTADIUS, L., MAGINNIS, S., MINNEMEYER, S., POTAPOV, P., SAINT-LAURENT, C. and SIZER, N.; 2011. Mapping opportunities for forest landscape restoration www.forestlandscaperestoration.org
- LEVERKUS, A.B., GUSTAFSSON, L., REY BENAYAS, J.M. and CASTRO, J.; 2015. Does post-disturbance salvage logging affect the provision of ecosystem services? A systematic review protocol. *Environ. Evid.*, **4**(1).

LÖF, M., DEY, D.C., NAVARRO, R.M. and JACOBS, D.F.; 2012. Mechanical site preparation for forest restoration. *New For.*, 43(5-6), pp. 825-848.

MCDONALD, P.M.; 1991. Container seedlings outperform barefoot stock: Survival and growth after 10 years. *New For.*, 5(2), pp. 147-156.

MENGERSEN, K., SCHMIDT, C., JENNIONS, M., KORICHEVA, J., and GUREVITCH, J.; 2013. Statistical models and approaches to inference. *Handbook of Meta-analysis in Ecology and Evolution*, 89-107.

MORIONDO, M., GOOD, P., DURAO, R., BINDI, M., GIANNAKOPOULOS, C. and CORTE-REAL, J.; 2006. Potential impact of climate change on fire risk in the Mediterranean area. *Clim. Res.*, 31(1), pp. 85-95.

MORRISSEY, R., JACOBS, D., DAVIS, A. and RATHFON, R., 2010. Survival and competitiveness of *Quercus rubra* regeneration associated with planting stocktype and harvest opening intensity. *New For.*, 40(3), pp. 273-287.

NAVARRO, R. M., VILLAR-SALVADOR, P., and DEL CAMPO, A.; 2006. Morfología y establecimiento de los plantones. In: Cortina, J., Peñuelas, J. L., Puértolas, J., Savê R., Vilagrosa, A. (eds). *Calidad de planta forestal para la restauración en ambientes mediterráneos degradados. Estado actual de conocimientos. Organismo Autónomo de Parques Naturales, Ministerio de Medio Ambiente, Madrid, Spain*, pp 67- 88.

NILSSON, U. and ÖRLANDER, G.R.; 2003. Response of newly planted Norway spruce seedlings to fertilization, irrigation and herbicide treatments. *Ann. For. Sci.*, 60(7), pp. 637-643.

O'BRIEN, M.J., ENGELBRECHT, B.M.J., JOSWIG, J., PEREYRA, G., SCHULDT, B., JANSEN, S., KATTGE, J., LANDHÄUSSER, S.M., LEVICK, S.R., PREISLER, Y., VÄÄNÄNEN, P. and MACINNIS-NG, C.; 2017. A synthesis of tree functional traits related to drought-induced mortality in forests across climatic zones. *J. Appl. Ecol.*, 54(6), pp. 1669-1686.

PERNOT, C., THIFFAULT, N. AND DESROCHERS, A.; 2019. Root system origin and structure influence planting shock of black spruce seedlings in boreal microsites. *For. Ecol. Manag.*, 433, pp. 594- 605.

POPE, P.E.; 1993. Oak regeneration via seedling planting: Historical perspective and current status. *Agriculture Research Programs Bulletin*. SB670.

R CORE TEAM; 2016. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.

RAFFA, K.F., AUKEMA, B.H., BENTZ, B.J., CARROLL, A.L., HICKE, J.A., TURNER, M.G. and ROMME, W.H.; 2008. Cross-scale Drivers of Natural Disturbances Prone to Anthropogenic Amplification: The Dynamics of Bark Beetle Eruptions. *Bioscience*, 58(6), pp. 501-517.

ROSENBERG, M. S.; 2005. The file-drawer problem revisited: a general weighted method for calculating fail-safe numbers in meta-analysis. *Evolution*, 59(2), 464-468. Ruehle, J.L.,

1985. Lateral-Root Development and Spread of *Pisolithus Tinctorius* Ectomycorrhizae on Bare-Root and Container-Grown Loblolly-Pine Seedlings After Planting. *For. Sci.*, 31(1), pp. 220-225.
- ROSNER, L.S. and ROSE, R.; 2006. Synergistic stem volume response to combinations of vegetation control and seedling size in conifer plantations in Oregon. *Can. J. of For. Res.*, 36(4), pp. 930-944.
- SCHNEIDER, C. A., RASBAND, W. S., and ELICEIRI, K. W.; 2012. NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. *Nat. Methods*, 9(7), 671-675.
- SERRADA, R.; 2001. Apuntes de Selvicultura. Fundación Conde del Valle de Salazar.
- SOUTH D.B.; 1986. Top-pruning bareroot hardwoods: a review of the literature, *Tree Plant. Notes* 47 34-40.
- SOUTH, D.B., HARRIS, S.W., BARNETT, J.P., HAINDS, M.J. and GJERSTAD, D.H.; 2005. Effect of container type and seedling size on survival and early height growth of *Pinus palustris* seedlings in Alabama, U.S.A. *For. Ecol. Manag.*, 204(2), pp. 385-398.
- STATSOFT, INC.; 2007. STATISTICA (data analysis software system), version 8.0. www.statsoft.com
- TRABUCCO, A., and ZOMER, R. J.; 2018. Global Aridity Index and Potential Evapotranspiration (ET0) Climate Database v2. CGIAR Consortium for Spatial Information (CGIAR-CSI). Published online, available from the CGIAR-CSI GeoPortal at <https://cgiarcsi.community>
- UNESCO; 1997. World atlas of desertification, 2nd edn. In: N. Middleton, D. Thomas (Eds.) Edward Arnold, London.
- VILLAR-SALVADOR, P., PUÉRTOLAS, J., CUESTA, B., PEÑUELAS, J.L., USCOLA, M., HEREDIA-GUERRERO, N. and REY BENAYAS, J.M.; 2012. Increase in size and nitrogen concentration enhances seedling survival in Mediterranean plantations. Insights from an ecophysiological conceptual model of plant survival. *New For*, 43:755-770.
- VIECHTBAUER, W.; 2010. Conducting meta-analyses in R with the metafor package. *J. Stat. Softw.*, 36(3), 1-48.
- YAMASHITA, N., OKUDA, S., SUWA, R., LEI, T.T., TOBITA, H., UTSUGI, H. and KAJIMOTO, T.; 2016. Impact of leaf removal on initial survival and growth of container-grown and bare-root seedlings of Hinoki cypress (*Chamaecyparis obtusa*). *For. Ecol Manag.*, 370, pp. 76-82.