



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

**INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS
AGRÍCOLAS**

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO EN CIENCIAS FORESTALES

**EFFECTO DE LA CONDICIÓN AMBIENTAL Y LA FERTILIZACIÓN EN
EL PREACONDICIONAMIENTO DE *Pinus engelmannii* CARR. EN
VIVERO Y SU DESEMPEÑO EN CAMPO**

JOSÉ LUIS GARCÍA PÉREZ

T E S I S

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:**

MAESTRO EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MEXICO

2014

La presente tesis titulada: **“EFECTO DE LA CONDICIÓN AMBIENTAL Y LA FERTILIZACIÓN EN EL PREACONDIONAMIENTO DE *Pinus engelmannii* CARR. EN VIVERO Y SU DESEMPEÑO EN CAMPO”** realizada por el alumno: **JOSÉ LUIS GARCÍA PÉREZ** bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado parcial de:

MAESTRO EN CIENCIAS

FORESTALES

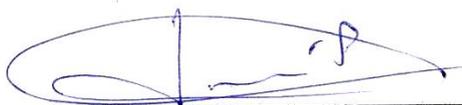
CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO:



DR. ARNULFO ALDRETE

ASESOR:



DR. JAVIER LÓPEZ UPTON

ASESOR :



DR. JOSÉ ÁNGEL PRIETO RUÍZ

Montecillo, Texcoco, Estado de México, Abril de 2014

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología CONACYT por la beca otorgada para la realización de mis estudios de maestría.

Al Colegio de Postgraduados-Campus Montecillo, en especial al personal del Postgrado Forestal y a sus académicos por trasmitirme sus conocimientos.

Al Vivero Forestal Fco. Villa, por proporcionar la planta utilizada en el experimento de campo y al INIFAP- Durango por el apoyo durante las evaluaciones del mismo.

Al Dr. Arnulfo Aldrete por sus consejos y apoyo en la dirección del presente trabajo.

Al Dr. Javier López Upton por sus sugerencias en la revisión del presente trabajo y por facilitar las instalaciones del Vivero Forestal para el desarrollo del experimento.

Al Dr. José Ángel Prieto Ruíz por depositar una vez más su confianza en mí e impulsarme para realizar un postgrado, por sus aportaciones al presente estudio así como por su apoyo incondicional en los trabajos de campo.

Al Dr. J. Jesús Vargas Hernández y al Dr. Humberto Vaquera Huerta por sus aportaciones y por el apoyo desinteresado con asesorías en el análisis estadístico de la información.

Al Dr. Miguel Ángel López López por su apoyo y amistad incondicional durante mi estancia en el postgrado y por ser un ejemplo como persona.

Al M. C. José Ángel Sígala R., Ing. Sergio Rosales M., Ing. Manuel Ornelas M. e Ing. Rosa Elvira Madrid A. del INIFAP-Durango por el apoyo brindado en la toma de datos en campo.

A mis amigos del Postgrado Forestal. Carolina, Moisés, Erickson, Hotón, Juan Carlos, Daniel de G. y Pedro quienes con su apoyo y motivación fue posible la culminación de este proyecto.

A las estudiantes del Instituto Tecnológico Superior de Zacapoaxtla, Puebla. Ofelia, Gisela Elisea, Carmen, Victoria y Zaira por su apoyo en las evaluaciones de calidad de planta.

A los trabajadores del Vivero Forestal del CP: Asunción, Maximino, José Luis, Lauro, Raúl y Manuel por su amistad y consejos durante el proceso de producción de planta en vivero.

A mis amigos del Postgrado de Genética: Ana Luisa, Viridiana, Jesús, Javier, Enrique, César, y Dr. Amalio Santacruz V. quienes con su amistad hicieron aún más grata mi estancia durante el postgrado.

A todos aquellos quienes de manera involuntaria he omitido, pero que contribuyeron en mi formación durante la maestría y en la terminación del presente trabajo.

¡A todos ustedes gracias!

DEDICATORIA

A mis padres: Adela y Alfredo

A mis hermanos: Jorge, Celina B. y J. Armando

A toda mi familia

A mis amigos y compañeros

y en especial a Ana Luisa, por su apoyo, cariño y comprensión.

CONTENIDO

Página

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN GENERAL	1
CAPÍTULO II. REVISIÓN DE LITERATURA	4
2.1. Descripción general e importancia de la especie.....	4
2.2. Calidad de planta	5
2.2.1. Atributos morfológicos de calidad de planta	5
a) Altura	6
b) Diámetro del cuello	6
c) Biomasa	7
d) Volumen de la raíz.....	7
e) Índice de robustez	8
f) Índice de calidad de Dickson	8
g) Relación biomasa aérea/biomasa radical.....	8
2.2.2. Atributos fisiológicos de calidad de planta	9
a) Concentración de nutrimentos	9
b) Contenido de carbohidratos	10
c) Estrés hídrico	10
d) Potencial de crecimiento radical.....	11
2.3. Fertilización en vivero	11
2.3.1. Nitrógeno.....	12
2.3.2. Fósforo	12
2.3.3. Potasio	12
2.4. Preacondicionamiento de la planta en vivero	13
2.4.1. Factores que influyen en el preacondicionamiento	13
a) Fotoperiodo.....	13
b) Sombreo.....	13
c) Temperatura.....	14
d) Estrés hídrico	14
e) Nutrición mineral.....	15

CAPÍTULO III. SUPERVIVENCIA Y CRECIMIENTO DE <i>Pinus engelmannii</i> CARR. DESPUÉS DEL PREACONDICIONAMIENTO EN VIVERO.....	16
RESUMEN.....	16
SUMMARY	17
3.1. INTRODUCCIÓN.....	18
3.2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	20
3.2.1. Localización del vivero	20
3.2.2. Condiciones de producción	20
3.2.3. Preacondicionamiento de la planta.....	21
3.2.4. Localización del sitio de plantación	22
3.2.5. Características del sitio de plantación	23
3.2.6. Establecimiento de la plantación.....	24
3.2.7. Variables evaluadas en campo	25
3.2.8. Análisis estadístico.....	25
3.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	26
3.3.1. Supervivencia.....	26
3.3.1.1. Supervivencia por condición ambiental.....	27
3.3.1.2. Supervivencia por fertilización.....	29
3.3.1.3. Interacción condición ambiental*fertilización.....	30
3.3.2. Crecimiento en altura y diámetro	32
3.3.2.1. Crecimiento en altura y diámetro por condición ambiental.....	32
3.3.2.2. Crecimiento en altura y diámetro por fertilización.....	33
3.3.2.3. Crecimiento en altura y diámetro por interacción condición ambiental*fertilización	34
3.4. CONCLUSIONES.....	35
CAPÍTULO IV. EFECTO DE LA CONDICIÓN AMBIENTAL Y LA FERTILIZACIÓN EN EL PREACONDICIONAMIENTO DE <i>Pinus engelmannii</i> CARR. EN VIVERO.....	37
RESUMEN.....	37
SUMMARY	38
4.1. INTRODUCCIÓN.....	39
4.2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	40

4.2.1. Localización del área de estudio	40
4.2.2. Condiciones de producción	40
4.2.3. Tratamientos de preacondicionamiento	41
4.2.4. Evaluación morfológica	42
4.2.5. Evaluación fisiológica	43
4.2.6. Concentración de nutrimentos en el follaje.....	43
4.2.7. Fase de plantación	43
4.2.8. Diseño experimental y análisis estadístico.....	44
4.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	45
4.3.1. Atributos morfológicos	45
4.3.2. Atributos fisiológicos	46
4.3.3. Potencial de crecimiento radical	48
4.3.4. Evaluación de respuesta al trasplante.....	49
4.4. CONCLUSIONES.....	51
CAPÍTULO V. LITERATURA CITADA	52

ÍNDICE DE CUADROS

Página

Cuadro 3.1. Tratamientos aplicados en el preacondicionamiento de plántulas de <i>Pinus engelmannii</i> Carr. con la combinación de condición ambiental y fertilización durante 64 días.....	21
Cuadro 3.2. Propiedades físico-químicas del suelo en los sitios de plantación para <i>Pinus engelmannii</i> Carr.	24
Cuadro 3.3. Significancia estadística para la supervivencia de <i>Pinus engelmannii</i> Carr. a los 28, 40 y 52 meses de plantado, en respuesta a cuatro condiciones ambientales y tres niveles de fertilización aplicados durante la fase de preacondicionamiento en vivero.....	27
Cuadro 3.4. Significancia estadística para altura y diámetro en <i>Pinus engelmannii</i> Carr. a los 28, 40 y 52 meses de plantado, en respuesta a cuatro condiciones ambientales y tres niveles de fertilización aplicados durante la fase de preacondicionamiento en vivero.....	32
Cuadro 3.5. Valores promedio de altura y diámetro en <i>Pinus engelmannii</i> Carr. a los 28, 40 y 52 meses de plantado, en respuesta a cuatro condiciones ambientales aplicadas durante la fase de preacondicionamiento en vivero.....	33
Cuadro 3.6. Valores promedio de altura y diámetro en <i>Pinus engelmannii</i> Carr. a los 28, 40 y 52 meses de plantado, en respuesta a tres niveles de fertilización aplicados durante la fase de preacondicionamiento en vivero.	33
Cuadro 3.7. Valores promedio de altura y diámetro en <i>Pinus engelmannii</i> Carr. a los 28, 40 y 52 meses de plantado, en respuesta a la interacción condición ambiental*fertilización aplicada durante la fase de preacondicionamiento en vivero.....	35

Cuadro 4.1. Valores promedio de las variables microclimáticas en la producción de <i>Pinus engelmannii</i> Carr.	41
Cuadro 4.2. Tratamientos aplicados en el preacondicionamiento de <i>Pinus engelmannii</i> Carr., condición ambiental-fertilización durante dos meses.....	42
Cuadro 4.3. Valores promedio y significancia estadística para las variables diámetro, biomasa, volumen radical (VR) y relación parte aérea/parte radical (RPAR) de <i>Pinus engelmannii</i> Carr., a los nueve meses de edad.	45
Cuadro 4.4. Valores promedio y significancia estadística para el efecto de las condiciones ambientales en la concentración y contenido de N, P y K en el follaje de <i>Pinus engelmannii</i> Carr.	47
Cuadro 4.5. Valores promedio y significancia estadística del potencial de crecimiento radical de <i>Pinus engelmannii</i> Carr., bajo el efecto de cuatro condiciones ambientales durante el preacondicionamiento.....	48
Cuadro 4.6. Valores promedio y significancia estadística para las variables diámetro final (DF), biomasa aérea (BA), radical (BR) y total (BT), volumen de raíz (VR), longitud raíz (LR), número de raíces primarias (NRP), tasa relativa de crecimiento en diámetro (TRCD) e incremento en diámetro (ID) en <i>Pinus engelmannii</i> Carr. después de 120 días de establecidas.	50

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 3.1. Ubicación geográfica del área de investigación.	22
Figura 3.2. Distribución de la temperatura y precipitación promedio en la estación Navíos Viejos, Durango, Dgo.	23
Figura 3.3. Supervivencia de <i>Pinus engelmannii</i> Carr. a los 28, 40 y 52 meses de plantado, en respuesta a cuatro condiciones ambientales aplicadas durante la fase de precondicionamiento en vivero.	27
Figura 3.4. Supervivencia de <i>Pinus engelmannii</i> Carr. a los 28, 40 y 52 meses de plantado, en respuesta a tres niveles de fertilización aplicados durante la fase de precondicionamiento en vivero.	29
Figura 3.5. Supervivencia de <i>Pinus engelmannii</i> Carr. a los 28, 40 y 52 meses de plantado, en respuesta a la interacción condición ambiental*fertilización, aplicada durante la fase de precondicionamiento en vivero.	31

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN GENERAL

Debido a la demanda creciente de bienes y servicios derivados de los recursos forestales, durante las últimas dos décadas la superficie de bosques, a nivel mundial, ha disminuido de 13 a 16 millones de hectáreas anuales; las principales causas de esta pérdida son la conversión no controlada de bosques a tierras de cultivo, así como las sequías e incendios (FAO, 2010a). En el caso de México, éste cuenta con 64, 802, 000 ha de bosques, lo que representa el 33 % del territorio nacional; sin embargo, se estima que durante el periodo del 2005 a 2010 la tasa de deforestación fue de 155,000 ha anuales (FAO, 2010b).

El estado de Durango, a pesar de ser la primera reserva forestal a nivel nacional, ha registrado una pérdida de 10,000 ha anuales de bosques durante los últimos años, por lo que de no revertir esta problemática se proyecta una pérdida para los próximos diez años de 100,000 ha de cubierta forestal (Valles *et al.*, 2011). Una alternativa para contrarrestar esta problemática es el establecimiento de plantaciones forestales, ya sean de recuperación en áreas degradadas o con fines comerciales con especies nativas o exóticas (Rodríguez, 2008).

Sin embargo, los esfuerzos realizados en los programas de reforestación no han tenido el éxito esperado, debido a que la supervivencia a nivel nacional es menor del 50 % al primer año después de plantado. Las principales causas de la mortalidad son: el pastoreo, los incendios y la baja calidad de la planta producida en los viveros forestales (CONAFOR, 2010). Por tal razón, para alcanzar altas tasas de supervivencia en campo, la producción de planta de calidad debe ser uno de los componentes más importantes en el proceso de reforestación (Wightman y Santiago, 2003).

El concepto de calidad de planta es relativo, dado que depende de la especie, clima, tipo de suelo, época de plantación, así como del propósito de la plantación. Estos factores definen los atributos morfológicos y fisiológicos de la planta para un determinado sitio de plantación. Además, puede ser un concepto efímero, debido a que la calidad puede perderse fácilmente cuando al terminar el ciclo de producción la planta no recibe un manejo adecuado o el transporte de ésta a los sitios de plantación se realiza de manera deficiente (Peñuelas y Ocaña, 1996). En México, estos problemas son recurrentes en las labores de reforestación, pues en muchos casos las plantas se establecen con altos niveles de estrés hídrico, ocasionados por el viento y a la falta de protección a la luz durante

el transporte de las plantas, así como por la falta de aplicación de riegos auxiliares previo a la plantación. Adicionalmente, el embalaje inadecuado produce daños físicos y mecánicos en las plantas, lo que reduce las posibilidades de supervivencia en campo (CONAFOR, 2010).

Desde hace más de dos décadas se introdujo el concepto de planta objetivo, el cual consiste en producir planta con determinadas características morfológicas y fisiológicas en función de los propósitos de la plantación, la especie y las características del sitio a reforestar (Rose *et al.*, 1990). Sin embargo, este concepto debe ser constantemente actualizado con información de los ensayos de desempeño en campo durante los primeros años, con el objetivo de retroalimentar y apoyar la toma de decisiones en los procesos de producción de planta de calidad (Landis *et al.*, 2010). A partir de la morfología de la planta es posible predecir su desempeño en campo, no obstante; los niveles óptimos varían entre especies y las condiciones de los sitios (Tsakalidimi *et al.*, 2013).

Una fase fundamental en la producción de planta de calidad es el proceso de precondicionamiento que recibe la planta previo a su salida del vivero. Este proceso se inicia una vez que la planta ha alcanzado aproximadamente el 80 % de la talla deseada (Landis *et al.*, 1999), y tiene como propósito promover en la planta el desarrollo de mecanismos de resistencia al estrés y otros factores a los que estará expuesta en los sitios de plantación. Los principales factores que promueven el precondicionamiento de la planta son: intensidad y duración del periodo de luz, temperatura, humedad del sustrato y la fertilización (Jacobs y Landis, 2009).

El precondicionamiento de la planta mediante fertilización consiste en reducir la aplicación de nitrógeno a fin de disminuir el crecimiento en altura, y aumentar las dosis de fósforo y potasio para estimular el crecimiento de la raíz y promover en la planta mecanismos de resistencia a deficiencias hídricas (Vilagrosa *et al.*, 2006). En tanto que la exposición a altos niveles de luminosidad durante el proceso de producción así como en el precondicionamiento en vivero, modifica la morfología de la planta (Barnett, 1999; Puértolas *et al.*, 2009), genera tensión hídrica (Aranda *et al.*, 2005) y promueve la acumulación de reservas en los tejidos (Pardos *et al.*, 2005).

En el estado de Durango, a través de los apoyos de la CONAFOR, se producen aproximadamente 12 millones de plantas al año del género *Pinus* en 15 viveros forestales, las cuales son destinadas a las labores de reforestación (Prieto *et al.*, 2011). En estos viveros, el precondicionamiento se realiza en forma empírica y solo se realiza mediante el retiro del plástico o malla sombra, así como

la aplicación de fertilizantes con alto contenido de potasio. Sin embargo, existe poca información con sustento científico sobre el precondicionamiento de la planta y que definan las mejores alternativas de manejo de la fertilización y las condiciones ambientales en la fase de precondicionamiento para favorecer la supervivencia y establecimiento en los sitios de plantación (Prieto *et al.*, 2012).

El presente trabajo tuvo como propósito: 1) Evaluar la supervivencia y crecimiento de *Pinus engelmannii* Carr. en campo, de planta producida bajo tres niveles de fertilización (sin fertilizar dosis baja y dosis alta) y cuatro condiciones ambientales (invernadero, intemperie, malla sombra, malla sombra más intemperie) aplicados durante la fase de precondicionamiento en vivero. 2) Evaluar el efecto de las condiciones ambientales y la fertilización en las características morfológicas y fisiológicas de *Pinus engelmannii* Carr. durante el precondicionamiento bajo el efecto de cuatro condiciones ambientales (invernadero, intemperie, malla sombra y malla sombra más intemperie) y un tratamiento adicional que consistió en la condición de intemperie en combinación con un nivel de fertilización, así como el efecto de estos tratamientos en la respuesta al trasplante.

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Descripción general e importancia de la especie

La especie *Pinus engelmannii* Carr. se caracteriza por tener alturas de hasta 35 m y 100 cm de diámetro, copa redondeada con ramas fuertes y horizontales. Los árboles jóvenes tienen ramas ascendentes y copa abierta en forma cónica. Tiene hábito cespitoso en sus etapas iniciales. Sus acículas son gruesas y rígidas y están en grupos de tres y cuatro, miden de 25 a 30 cm (Perry, 1991). Los conos miden de 10 a 15 cm de longitud, son ligeramente encorvados, duros, color café amarillento y están en grupos de dos a cinco. Las semillas son casi de forma ovoide, miden de 5 a 7 mm de largo por 4 a 6 mm de ancho, son de color café oscuro (Martínez, 1992), en promedio se obtienen 22, 000 semillas por kilogramo (García y González, 1998), aunque puede llegar a 28, 000 (Prieto y López, 2006).

Se distribuye en forma natural en la sierra Madre Occidental, en pequeñas poblaciones en las montañas del sur de Arizona y Nuevo México en Estados Unidos (Alexander y Ronco, 1987), mientras que en México, se localiza en los estados de Sonora, Chihuahua, Durango, Sinaloa y Zacatecas. Prefiere altitudes de entre 1800 y 2600 m, sitios con precipitación entre 400 a 800 mm, temperaturas promedio de 13 y 15 °C. Crece en suelos leptosoles, desde delgados arenosos, pedregosos, con poca materia orgánica a profundos con textura arcillosa, migajón limoso, arcilloso y un pH ácido (Perry, 1991). Coexiste con otras especies de *Pinus*, así como con diversas especies de los géneros *Quercus*, *Arctostaphylos*, *Juniperus* y *Pseudotsuga* (Rentería y García, 1997).

Por su aprovechamiento con fines maderables *Pinus engelmannii* Carr. es de las especies con mayor valor económico en el norte de México (Corral *et al.*, 2004). Esta especie es ampliamente utilizada en plantaciones con fines de restauración y recuperación de suelos degradados y en años recientes en plantaciones con fines comerciales (Mejía *et al.*, 2011). Adicionalmente, dados los limitados requerimientos ecológicos de la especie, se han identificado áreas con alto potencial para el establecimiento de plantaciones forestales con comerciales el norte de México (Martínez y Prieto, 2011).

2.2. Calidad de planta

Una planta de calidad es aquella que a su salida de vivero cuenta con características morfológicas y fisiológicas adecuadas para lograr sobrevivir y establecerse exitosamente en campo, donde estará expuesta a condiciones ambientales adversas (Rodríguez, 2008). En la aptitud para sobrevivir y tolerar el estrés postransplante intervienen diversos factores como la calidad genética, morfológica y sanitaria (Villar-Salvador, 2003). Cuando estas características se cumplen, desde el punto de vista económico se reducen costos por labores de reposición; además, se reduce el tiempo de establecimiento y cosecha de las reforestaciones (Duryea, 1985).

Sin embargo, el concepto de calidad de planta es relativo, debido a que está condicionado por diversos factores como los objetivos de la reforestación, la heterogeneidad de los sitios a reforestar, las características de las especies utilizadas y los regímenes de cultivo en vivero (Cortina *et al.*, 2006). Desde hace décadas el concepto de planta objetivo se introdujo en los programas de reforestación en Estados Unidos (Rose *et al.*, 1990); además, en la definición más actualizada del concepto, Landis *et al.* (2010) incluyen factores como duración de la época de plantación y las herramientas o técnicas para efectuarla.

Históricamente los estudios sobre calidad de planta se han enfocado a predecir el desempeño de especies de coníferas debido a su alta demanda en actividades de reforestación a nivel mundial en comparación con las especies latifoliadas. Sin embargo, para evaluar la calidad de estas últimas se aplican los mismos criterios que en las coníferas, lo que en algunos casos genera interpretaciones imprecisas. Por ello, es necesario establecer criterios de evaluación adecuados para este grupo de especies, los cuales se adapten a las características morfológicas, fisiológicas y fenológicas, lo que permitiría mejorar su capacidad predictiva del desempeño de este tipo de plantas en diversos ambientes (Wilson y Jacobs, 2006).

2.2.1. Atributos morfológicos de calidad de planta

Las características morfológicas de las plantas son de fácil medición; además, algunas de ellas se obtienen mediante métodos no destructivos, donde los valores son cuantitativos por lo que permiten un control estadístico de la calidad de las plantas en el vivero (Puttonen, 1996). Tradicionalmente, los atributos morfológicos en evaluaciones de calidad de planta son: altura del tallo, diámetro del cuello de la raíz, peso seco y la relación peso seco aéreo y radical (Pinto, 2011).

Sin embargo, cuando estos se correlacionan con la supervivencia, el diámetro del cuello es el más consistente en la mayoría de los estudios (Landis, 2011). Aún así se carece de predicciones perfectas de la supervivencia de las plantas en campo atribuida a un atributo morfológico individual (Haase, 2007).

a) Altura

En coníferas se ha correlacionado la altura con el número de acículas en el tallo y con la capacidad fotosintética y el área de transpiración de la planta, así mismo tiene relación directa con la altura inicial durante los primeros años (Ritchie *et al.*, 2010), pero no se le ha encontrado un nivel satisfactorio de asociación con la supervivencia, particularmente en sitios con humedad escasa, debido que la parte de transpiración es mayor que la de absorción, lo que genera un desbalance hídrico entre las partes de la planta y en consecuencia ocasiona mayor mortalidad. Además, cuando se establecen plantas de mayor altura son más susceptibles a daños físicos por vientos o fauna nociva. No obstante, si las plantas son de mayor altura tendrán ventajas competitivas cuando se plantan en sitios con hierbas y arbustos pequeños (Haase, 2007).

Jobidon *et al.* (2003) en un estudio con *Picea mariana* (Mill.) Britton, Sterns & Poggenburg y *P. glauca* (Moench) Voss obtuvieron mejores crecimientos en altura y diámetro a los ocho años de establecida en campo, cuando utilizaron planta de mayor tamaño en sitios con competencia, lo cual no ocurrió para la supervivencia. Por su parte, Li *et al.* (2011) encontraron una correlación positiva entre la altura de la planta de *Larix olguensis* A. Henry con la supervivencia al primero y segundo año de plantado; así mismo, la relación con la altura y diámetro fue positiva y persistió durante los tres primeros años. En contraste, Sosa y Rodríguez (2003) encontraron mayores incrementos en altura de *Pinus patula* Schlecht *et* Cham cuando se utilizó planta menor a 30 cm de altura inicial, tanto en sitios quemados como en un sitio no quemado, no así para la supervivencia.

b) Diámetro del cuello

El diámetro del cuello se considera el atributo con mejor capacidad predictiva de la supervivencia en campo debido a su consistencia en diversos estudios (Thompson, 1985; Mexal y Landis, 1990). Por lo general, éste se correlaciona con el tamaño del sistema radical y el volumen del tallo; además, se le asocia con la resistencia contra sequía y calor (Haase, 2008). Funciona mejor en especies con hábito cespitoso. Las plantas con diámetros mayores son más resistentes a daños

físicos causados por factores ambientales adversos y fauna nociva (Rodríguez, 2008). En algunos casos el diámetro del cuello, ha servido para discriminar plantas de desecho, debido a que después de ciertos valores ocurre enrollamiento de raíces en plantas producidas en contenedor, lo que reduce la calidad de éstas y en consecuencia disminuyen sus posibilidades de supervivencia en campo (South y Mitchell, 2005).

South *et al.* (2005) encontraron los mayores porcentajes de supervivencia en plantas de *Pinus palustris* Mill. producidas en contenedor cuando su diámetro al momento de plantar fue de al menos 9 mm (80 %), mientras que en plantas producidas a raíz desnuda se encontró la mejor supervivencia cuando el diámetro fue de 12 mm (90 %). Así mismo, Gardiner *et al.* (2009) en plantas de *Quercus nuttalli* Palmer y *Carya illinoensis* (Wangenh.) K. Koch observaron incrementos de 26 a 33 % de supervivencia al tercer año de plantado cuando el diámetro inicial varió de 2 a 18 mm en ambas especies. Por otro lado, Dey y Parker (1997) correlacionaron positivamente el diámetro inicial con el diámetro del tallo, volumen de raíz, biomasa seca de raíces laterales así como la biomasa seca total de raíz en plantas de *Quercus rubra* L. a los dos años de plantado en sitios con aclareo. Por su parte, Rose y Ketchum (2003) en *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) observaron que después de cuatro años de establecida, los mayores incrementos en volumen (35-45 %) se lograron cuando utilizaron plantas con diámetros mayores a 2 mm.

c) Biomasa

Por lo general, la biomasa se determina obteniendo el peso seco de la planta completa mediante la suma del peso aéreo y de la raíz de la planta, lo cual representa la cantidad de materia seca que se formó durante el crecimiento en vivero. Por un lado, la biomasa aérea es un indicador de la eficiencia fisiológica durante el desarrollo de las plantas, mientras que el peso seco de la raíz refleja la capacidad de la planta para absorber nutrimentos y agua del suelo una vez establecida en campo (Thompson, 1985). En *Pinus palustris* Mill. producido en contenedor se encontró una correlación entre las variables peso seco de la parte aérea y peso seco de acículas primarias, evaluadas al momento de plantar con la supervivencia al primer año de plantado (Rodríguez y Duryea, 2003).

d) Volumen de la raíz

El volumen de raíz es más difícil de medir que otros atributos morfológicos. Para ello, se utiliza el método de desplazamiento de volumen de agua en una balanza electrónica (Harrington *et al.*,

1994). Se ha encontrado que conforme se incrementa el volumen de la raíz, las plantas tienden más a sobrevivir y establecerse adecuadamente en campo (Rose y Haase, 1995). Al respecto, Davis y Jacobs (2005) encontraron una correlación positiva del volumen de raíz con la supervivencia y el crecimiento inicial en plantas de *Quercus rubra* L. y *Quercus alba* L. Por su parte Haase y Rose (1993) en un estudio previo, relacionaron el valor de esta variable con la resistencia al estrés hídrico al trasplantar *Pseudotsuga menziesii* (Mirb), excepto en condiciones de sequía extrema.

e) Índice de robustez

Este índice es ampliamente utilizado cuando se evalúa planta producida en contenedor, la cual por lo general presenta crecimientos mayores en altura que en diámetro cuando se cultiva a altas densidades (Ritchie *et al.*, 2010). Su valor es inversamente proporcional a la calidad de planta; es decir, a menores valores, las plantas son robustas y con tallo vigoroso; en cambio, valores altos indican plantas esbeltas con desproporción entre el crecimiento en altura y el diámetro, lo cual reduce el grado de resistencia de las plantas a condiciones ambientales limitativas, por lo tanto disminuyen las posibilidades de establecimiento en campo (Rodríguez, 2008).

f) Índice de calidad de Dickson

Este indicador fue propuesto por Dickson *et al.* (1960) e integra en un solo valor al peso seco total, índice de robustez y relación parte aérea radical. Su valor es directamente proporcional a la calidad de planta y se determina con la siguiente expresión:

$$\text{Índice de calidad} = \frac{\text{Peso seco total (g)}}{\frac{\text{Altura (cm)}}{\text{Diámetro (mm)}} + \frac{\text{Peso seco parte aérea (g)}}{\text{Peso seco raíz (g)}}}$$

g) Relación biomasa aérea/biomasa radical

Esta relación representa un balance entre el tejido transpiracional y el tejido absorbente de agua y nutrientes de la planta, si este valor es cercano a uno, existe un balance entre la biomasa aérea y la biomasa radical; por otro lado, cuando es mucho mayor a uno, la biomasa aérea es mayor que la radical, lo que se reflejará en pérdidas de humedad por elevados niveles de transpiración por lo que no se recomiendan utilizarla para reforestar sitios con restricciones de humedad (Rodríguez, 2008).

Al respecto, Romero *et al.* (1986) recomiendan que para especies de coníferas en Estados Unidos la relación parte aérea-raíz debe ser de 1.5 a 2.2 y su valor puede diferir entre especies y sistemas de producción. En contraste, Villar-Salvador *et al.* (2004a) señalan una relación inversa entre el valor de este atributo con la supervivencia y crecimiento inicial de *Quercus ilex* L. a los dos años de establecido en ambientes mediterráneos.

2.2.2. Atributos fisiológicos de calidad de planta

Los atributos fisiológicos de calidad de planta no son apreciables visualmente; además, son difíciles de medir debido a que se requieren equipo especializado de laboratorio (Ritchie *et al.*, 2010). Por otro lado, tienen la ventaja de que determinan el estado fisiológico de las plantas, lo cual no siempre se refleja en la morfología, por lo que deben considerarse como un complemento de estos y no como pruebas alternativas (Villar-Salvador *et al.*, 2009). Los más comunes se describen en seguida:

a) Concentración de nutrimentos

Los nutrimentos son suministrados a la planta a través de la fertilización. Las demandas de éstos en la planta varían en función del estado de desarrollo de la misma. Existen rangos óptimos de contenido de nutrimentos en las plantas, si estos son deficientes pueden originar enfermedades y limitar su crecimiento. Por otro lado, si su concentración es excesiva, puede causar muerte por toxicidad (Landis, 1985). Su evaluación generalmente se realiza para los principales macronutrientes. En el caso del follaje de coníferas en Estados Unidos producidas en contenedor las concentraciones de N, P y K deben fluctuar entre 1.4 a 2.2 % de nitrógeno, 0.2 a 0.4 % para fósforo y 0.4 a 1.5 % para potasio (Landis, 1989).

Villar-Salvador *et al.* (2004a) encontraron que la fertilización con nitrógeno en vivero, tanto en bajas como en altas concentraciones mejoró los niveles de altura, relación parte aérea raíz, potencial de crecimiento radical, así como la concentración de fósforo en el tallo y en la raíz. Así mismo, favoreció la supervivencia y crecimiento inicial de *Quercus ilex* L. en ambientes mediterráneos a los dos años de plantado. Por su parte, Jackson *et al.* (2012) observaron que conforme se incrementaron las aplicaciones de nitrógeno en la producción de *Pinus palustris* Mill. se favoreció su crecimiento inicial; sin embargo, no tuvo efecto en la supervivencia.

Otra forma de evaluar el contenido y concentración de nutrimentos es el método gráfico de vectores el cual se aplica cuando se tiene el peso seco de los tejidos y los resultados de los análisis foliares. Con este método se puede diagnosticar de manera más precisa el estado nutricional de las plantas o bien la respuesta de tratamientos aplicados durante la fase de vivero. Adicionalmente, es posible detectar efectos de dilución, toxicidad, así como suficiencia o deficiencia de un determinado nutrimento en los tejidos de la planta (Timmer y Stone, 1978; Haase y Rose, 1995).

b) Contenido de carbohidratos

En las plantas, los carbohidratos son la principal fuente de reservas alimenticias y se encuentran en forma de azúcares y almidones. Éstos habilitan a la planta para mantener sus funciones bajo condiciones de estrés hasta que la fotosíntesis es capaz de solventar las demandas de reservas para el crecimiento y respiración de la misma (Marshall, 1985). Su disponibilidad está en función de los factores que regulan la fotosíntesis como la luz, temperatura, reservas de nutrientes, así como la edad del follaje (Johnson y Cline, 1991). Altos contenidos de carbohidratos promueven la formación de tejidos nuevos, así mismo favorecen la recuperación de las plantas después de un estrés severo, ante tensiones y daños (Rodríguez, 2006).

Royo y Pardos (2001) encontraron una fuerte correlación entre el contenido de carbohidratos en la raíz y la supervivencia al año de plantado en *Pinus halepensis* Mill. Así mismo, Rodríguez y Duryea (2003), correlacionaron el contenido de azúcares en la raíz principal con la longitud del tallo y el peso anhidro total en *P. palustris* Mill. producido en contenedor.

c) Estrés hídrico

Cuando las plantas son sometidas durante largo tiempo a tensión hídrica, se altera el proceso de asimilación de CO₂ y de transpiración, lo que se refleja en alteraciones del aparato fotosintético y en consecuencia en una reducción de su crecimiento. Por ello, para mantener un crecimiento adecuado de las plantas se recomienda que el potencial hídrico del tallo, ramas y hojas se mantenga de niveles ligeros a moderados; es decir, sus valores deben fluctuar entre -0.5 a 0 Mpa; sin embargo, durante el precondicionamiento en vivero, estos niveles pueden variar de -1.5 a -0.5 Mpa para algunas especies (Lopushinsky, 1990).

d) Potencial de crecimiento radical

El potencial de crecimiento radical se define como la cuantificación de la habilidad de las plantas para iniciar y elongar nuevas raíces durante un cierto periodo de tiempo bajo un ambiente óptimo para el crecimiento de las mismas (Ritchie *et al.*, 2010). En muchos casos este atributo se ha utilizado como predictor del desempeño cuando la captación de agua depende del crecimiento de nuevas raíces; sin embargo, existe controversia sobre su uso como tal, debido a que su lógica es débil, pues por lo general las plantas se establecen cuando las temperaturas de los suelos están por abajo del óptimo para el crecimiento de la raíz (Simpson y Ritchie, 1996).

En un estudio con plantas de *Pterocarpus indicus* Willd. Gazal *et al.* (2004), encontraron que tanto la humedad del sustrato como la duración de la prueba afectan la elongación de nuevas raíces así como las variables morfológicas de la planta. Por su parte Oliet *et al.* (2003) en un estudio con *Pinus halepensis* Mill. reportaron porcentajes de supervivencia superiores al 80 % cuando las plantas presentaron 17 raíces nuevas o más. Así mismo, del Campo *et al.* (2007) en la misma especie observaron una fuerte relación entre el potencial de crecimiento radical y la supervivencia en sitios tanto de baja como de alta calidad en ambientes mediterráneos.

2.3. Fertilización en vivero

La fertilización es uno de los elementos más importantes que influyen en la morfología de la planta, en particular cuando se produce en contenedor, ya que permite controlar el crecimiento al influir en los niveles de reservas, lo que favorece la capacidad de arraigo, la resistencia a estrés hídrico, así como al frío y a la presencia de enfermedades (Landis, 1989).

Una adecuada nutrición mineral es esencial para el crecimiento de las plantas (Pallardy, 2008). Para ello, las plantas requieren al menos 16 elementos, de los cuales el carbono, oxígeno e hidrógeno, cumplen funciones estructurales. Los 13 restantes son conocidos como macro y micronutrientes, y se agrupan en función de las concentraciones de éstos en la planta. El primer grupo lo constituyen en orden de importancia el nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio y azufre. Por otro lado, el segundo grupo lo forman el hierro, manganeso, zinc, cobre, boro, cloro y molibdeno (van den Driessche, 1991). Sin embargo, debido a su alta demanda para efectuar los procesos vitales en las plantas, el nitrógeno, fósforo y potasio, reciben especial atención. A

continuación se describen algunas de las principales funciones de estos nutrientes en el proceso de producción de planta en vivero:

2.3.1. Nitrógeno

El nitrógeno se encuentra en altas concentraciones en la planta, las cuales llegan a representar una tercera parte del contenido nutrimental. En vivero, el nitrógeno favorece el crecimiento en altura, propicia el crecimiento de acículas largas y delgadas. En la fase de establecimiento se requieren dosis bajas, mientras que la fase de desarrollo se aplican dosis altas, debido a que se busca maximizar el crecimiento en altura, mientras que en la fase de precondicionamiento se reducen la adición de nitrógeno con la finalidad de inducir latencia y endurecimiento de los tejidos debido a que la división celular es más lenta, lo que produce paredes celulares más gruesas, las cuales son más resistentes al estrés físico (Landis y van Steenis, 2003).

2.3.2. Fósforo

El fósforo constituye el principal medio de transporte de energía en la planta, es translocado rápidamente (Pallardy, 2008). Estimula el crecimiento radical frente a la parte aérea (Salisbury y Ross, 1985). Es altamente lixiviable con la aplicación de riegos en vivero. Durante la fase de establecimiento se requiere para mantener los procesos metabólicos y en la fase de desarrollo la demanda de fósforo se incrementa, debido a que la planta lo requiere para soportar los altos niveles de metabolismo y división celular, en cambio en el precondicionamiento, se asume que el fósforo incrementa el crecimiento de la raíz; sin embargo, existe poca información que sustente esta aseveración, pues en algunos viveros, ha mostrado no tener efecto en el crecimiento de la raíz (Landis y van Steenis, 2005).

2.3.3. Potasio

El potasio es altamente móvil en la plantas, influye en la activación de enzimática, síntesis de proteínas y ajuste osmótico lo que contribuye a mejorar su tolerancia al estrés y bajas temperaturas (Rook, 1991). Debido a que se acumula en tejidos en crecimiento activo como en raíces nuevas, favorece la captación y retención de agua. Además, promueve la resistencia a heladas, así como a plagas y ataque por hongos o plagas. Por otro lado, su efecto es mayor en las relaciones hídricas, por lo que quizá sea recomendado para reforestaciones en ambiente secos. Sin embargo, la práctica

de incrementar el potasio en la fertilización durante el endurecimiento parece ser infundada debido a que existen escasas evidencias (Landis, 2005).

2.4. Preacondicionamiento de la planta en vivero

La fase de preacondicionamiento tiene cuatro objetivos fundamentales: a) controlar la morfología final de las plantas; b) aclimatizar las plantas a condiciones ambientales de campo; c) promover el desarrollo de mecanismos fisiológicos de resistencia al estrés postransplante y d) mejorar la supervivencia y crecimiento después del trasplante (Landis *et al.*, 1999). Se inicia cuando la planta alcanza entre un 80 y 90 % de la altura deseada; sin embargo, se deben conocer los hábitos de crecimiento de las especies a cultivar (Escobar, 2012). Para lograr estos objetivos se utilizan diversas combinaciones de prácticas culturales, como son: variaciones en la temperatura, dosis de fertilización, intensidades de luminosidad mediante el uso de malla sombra, así como niveles de estrés hídrico a través de rutinas de riego (Landis, 1992).

2.4.1. Factores que influyen en el preacondicionamiento

a) Fotoperiodo

Cuando se reduce el fotoperiodo indica un receso vegetativo en las plantas, induce mayor lignificación e incrementa el contenido de carbohidratos solubles en el follaje (Escobar, 2012). Esta práctica es utilizada en viveros localizados en latitudes altas donde en fotoperiodo se reduce lentamente tras el solsticio de verano, y las plantas están adaptadas a reconocer esos estímulos para detener su crecimiento (Jacobs y Landis, 2009).

b) Sombreo

El uso de sombreo depende de la tolerancia a la sombra de las diversas especies y las condiciones en el sitio de plantación. Algunas especies tienden a crecer excesivamente en altura cuando los niveles de sombra son elevados, lo cual es desfavorable debido a que crea un desbalance entre la parte aérea y radical de las plantas. No obstante, si el sitio a reforestar se encuentra debajo de un dosel, el sombreo en vivero se vuelve más útil. Por el contrario, si las plantas son destinadas a sitios a pleno sol, esta práctica no es necesaria durante todo el proceso de producción, incluyendo el preacondicionamiento (Jacobs y Landis, 2009).

En un estudio con *Pinus palustris* Mill. y *P. taeda* L., Barnett (1989) encontró una mejor respuesta en biomasa aérea y radical así como en diámetro del cuello, cuando se produjeron estas especies a sol directo que cuando crecieron bajo malla sombra al 50 y 30 %. Por su parte Puértolas *et al.* (2009) en un estudio con *Quercus ilex* L. y *Pinus halepensis* Mill, encontraron que el efecto del sombreado no influyó en la calidad de planta ni en la supervivencia en campo de *Quercus ilex* L., mientras que en *Pinus halepensis* la calidad se redujo cuando se cultivó bajo malla sombra con 95 % de reducción en la radiación fotosintéticamente activa, esta tendencia persistió a los tres años de plantado en la supervivencia y crecimiento. En un estudio previo, Khan *et al.* (2000) observaron en *Pinus ponderosa* Douglas *ex* Lawson, *Pseudotsuga menziesii*, *Thuja plicata* Donn *ex* D. Don in Lambert y *Tsuga heterophylla* (Raf.) Sarg. mejor calidad morfológica en las plantas cuando crecieron en malla sombra al 35 % y a sol directo, con respecto a aquellas que estuvieron bajo niveles de 55 y 75 % de sombra.

c) Temperatura

La temperatura regula los procesos fisiológicos de transpiración y respiración. En interacción con la velocidad del viento sobre el follaje, la humedad en la planta influye sobre la transpiración. Por otro lado, la temperatura nocturna tiene efecto directo sobre las tasa de fotosíntesis-respiración, la cual es importante en el crecimiento y acumulación de reservas de las plantas (Escobar, 2012).

En regiones de clima templado frío, la temperatura del aire afecta la inducción a latencia, debido a que la exposición gradual a bajas temperaturas durante el otoño, genera una señal en las plantas de que se aproxima el invierno, para que generen mecanismos de resistencia al frío. Una estrategia que utilizan los viveristas para lograr esto es exponer las plantas gradualmente a cambios moderados de temperatura, retirándolas del invernadero a condiciones ambientales en malla sombras o directamente a ambientes abiertos (Jacobs y Landis, 2009).

d) Estrés hídrico

Este tipo de endurecimiento tiene por objeto someter al cultivo a un determinado grado de sequía que detenga el crecimiento de las plantas y active sus mecanismos de resistencia a condiciones de déficit hídrico (Vilagrosa *et al.*, 2006). No obstante, al restringirse la humedad se debe evitar el marchitamiento permanente, por lo que se considera el método de precondicionamiento más complicado, debido a que se requiere de mucha observación y experiencia para realizarlo

eficientemente. Existen diversas técnicas para medir el estado hídrico de las plantas; sin embargo, para fines operativos se realiza mediante el peso de contenedores (Jacobs y Landis, 2009).

Desde el punto de vista fisiológico, cuando existen condiciones de estrés hídrico en las plantas, se genera pérdida de turgencia, cesa el crecimiento, mientras aumenta la acumulación de solutos, los cuales son reutilizados por la planta para la formación de raíces nuevas una vez que se reanudan las condiciones óptimas de desarrollo. Adicionalmente, las plantas bajo estrés hídrico generan mecanismos de tolerancia ante la sequía, debido a que son más capaces de absorber agua de suelos más secos, debido al potencial hídrico negativo de éstas, mientras que ante bajas temperaturas la concentración de solutos disminuye el punto de congelamiento (Peñuelas y Ocaña, 1996).

Royo y Pardos (2001) encontraron que menores niveles de estrés hídrico afectan la morfología de las plantas de *Pinus halepensis* Mill., particularmente las plantas crecen más en altura, diámetro y biomasa de la parte aérea y radical. Por otro lado, disminuyó la concentración de almidón y carbohidratos solubles. A pesar de ello, los tratamientos no tuvieron efecto en la supervivencia. Por su parte, Prieto *et al.* (2004) encontraron que la reducción del potencial hídrico hasta -2.29 MPa modificó la morfología principalmente en crecimiento en altura, diámetro del cuello y producción de biomasa en *Pinus engelmannii* Carr.

e) Nutrición mineral

Debido a que en el preacondicionamiento tiene la finalidad de reducir el crecimiento en altura, durante su realización es conveniente reducir o suspender por varias semanas la aplicación de nitrógeno para inducir un estrés nutrimental ligero. Cuando se usan fertilizantes de liberación controlada de más de 6 meses de liberación, se corre el riesgo de que las plantas no se lignifiquen y queden susceptibles a daños por heladas. Una alternativa es la adición de nitrógeno en forma de nitrato, el cual no promueve el crecimiento en altura de la planta. Adicionalmente, las aplicaciones de calcio, fortalecen las paredes celulares y desarrollan ceras en las hojas para proteger las plantas durante el invierno (Jacobs y Landis, 2009).

CAPÍTULO III
SUPERVIVENCIA Y CRECIMIENTO DE *Pinus engelmannii* CARR. DESPUÉS DEL
PREACONDICIONAMIENTO EN VIVERO.

RESUMEN

El preacondicionamiento de la planta se realiza durante la etapa final de vivero y tiene como propósito favorecer su lignificación para que sea capaz de tolerar el estrés hídrico, nutricional y mecánico en los sitios de plantación. Esto se logra mediante un manejo adecuado de prácticas culturales como la fertilización y los riegos, mientras se elimina el efecto invernadero las plantas se exponen a condiciones ambientales de temperatura, humedad relativa e intensidad de luz, semejantes a las presentes en el campo. Se evaluó el efecto de: a) cuatro condiciones ambientales (invernadero, intemperie, malla sombra y malla sombra más intemperie) y b) tres niveles de fertilización (sin fertilización, dosis baja y dosis alta) y la interacción de éstos durante el preacondicionamiento en vivero, en la supervivencia y crecimiento inicial de *Pinus engelmannii* Carr. en campo. Se realizaron tres evaluaciones, a los 28, 40 y 52 meses de establecida. Las variables evaluadas fueron supervivencia y crecimiento, en altura y diámetro. Después de 52 meses de establecida la plantación, las condiciones ambientales de preacondicionamiento en vivero afectaron la supervivencia ($p \leq 0.05$). La mayor supervivencia se logró en las plantas expuestas a la condición de intemperie y malla sombra con 69 y 60 %, respectivamente. La fertilización no afectó la supervivencia durante todo el periodo de evaluación ($p \geq 0.05$). El efecto combinado de la condición ambiental y la fertilización influyó en la supervivencia ($p \leq 0.05$), los tratamientos formados por la condición de intemperie más dosis alta y baja de fertilización fueron los mejores con 76 y 70 % de supervivencia, respectivamente. Los mejores niveles de altura se registraron cuando las plantas estuvieron preacondicionadas a la intemperie con dosis altas de fertilización, mientras que el diámetro tuvo su mejor nivel en la condición de malla sombra y a la intemperie, ambas con dosis bajas de fertilización. La mayor supervivencia se obtuvo cuando las plantas se preacondicionaron a la intemperie y en malla sombra durante dos meses. Los niveles de fertilización no afectaron la supervivencia.

Palabras clave: *Pinus engelmannii*, calidad de planta, condición ambiental, fertilización, preacondicionamiento, vivero.

SURVIVAL AND GROWTH OF *Pinus engelmannii* CARR. AFTER HARDENING STAGE IN NUSERY

SUMMARY

Hardening is carried out at the end of nursery stage and its purpose is to prepare the plants in order to be able to tolerate water, nutrient and mechanical stresses at the outplanting site. This is achieved through suitable management of the cultural practices such as fertilization and irrigation, eliminating greenhouse effect and exposing the plants to environmental conditions of temperature, relative humidity and light intensity similar to the field. We assessed: a) four environmental conditions (greenhouse, outdoor, shade cloth and shade cloth-outdoor combination) and b) three fertilization levels (unfertilized, low and high) and their interaction during hardening in nursery and its effect on survival and field performance of *Pinus engelmannii* Carr. We performed tree evaluations at 28, 40 y 52 months after planted. Variables evaluated were survival and growth in terms of height and diameter at ground level. At 52 months after plantation, environmental conditions applied during the hardening stage affected the survival ($p \leq 0.05$). The higher survival rate was in seedlings exposed at outdoor and shade cloth conditions showing 69 and 60 %, respectively. Fertilization did not affected the survival for this evaluation period ($p \geq 0.05$). Interaction of environmental conditions and fertilization affected the survival ($p \leq 0.05$), treatments formed by outdoor condition and low and high level of fertilization were the best with 76 and 70 % respectively. The highest seedlings resulted when seedlings were hardened in outdoors environmental condition with high fertilization level, while diameter was higher in shade cloth and outdoor conditions, both with low fertilization level. The highest survival can be obtained when seedlings are hardened in outdoors and shade cloth conditions during two months. Fertilization levels did not affected survival.

Key words: *Pinus engelmannii*, seedling quality, environmental condition, fertilization, hardening, nursery.

3.1. INTRODUCCIÓN

En México, para revertir la degradación forestal las políticas ambientales se centran en la restauración de ecosistemas forestales mediante la reforestación, conservación de suelos y manejo de cuencas hidrológicas. Las plantaciones forestales son importantes al sustituir o complementar los bienes y servicios que aportan los bosques naturales (Rodríguez, 2008). Por ello, cada año se reforestan varios millones de plantas; sin embargo, la supervivencia es baja debido a diversas causas, entre las que destaca la baja calidad de planta (Wightman y Santiago, 2003; Mexal *et al.*, 2008; CONAFOR, 2010).

Las características morfológicas y fisiológicas pueden predecir el desempeño de las plantas en campo (Rodríguez y Duryea, 2003; South *et al.*, 2005); no obstante, la capacidad predictiva de éstas puede variar dependiendo de la especie (Tsakalidimi *et al.*, 2013), de las condiciones edáficas de los sitios de plantación (Pinto *et al.*, 2011), del tipo de preparación del terreno (Knapp *et al.*, 2006), del micrositio (Rodríguez *et al.*, 2012) y de las prácticas culturales durante la producción en vivero (Navarro *et al.*, 2006).

La fertilización en vivero modifica la morfología y fisiología de las plantas (Cortina *et al.*, 2013). Navarro *et al.* (2013) encontraron que al incrementar la fertilización en *Abies religiosa* Kunth Schltdl. *et* Cham. se obtuvieron incrementos en altura y diámetro, acumulación de biomasa radical y la concentración de nutrimentos. Por su parte, Luis *et al.* (2010) observaron en plantas de *Pinus canarensis* C. Smith *ex* Buch producidas bajo sombra y a sol directo, que la fertilización incrementó el crecimiento y distribución de biomasa, así como la tasa de fotosíntesis; sin embargo, se redujo la conductancia hidráulica de la raíz. Así mismo, Jose *et al.* (2003) encontraron en *Pinus palustris* Mill. mayor crecimiento, producción de biomasa, fotosíntesis y concentración de nutrimentos, cuando aplicaron niveles altos de nitrógeno.

Una fase crítica durante en el proceso de producción de planta de calidad es el preacondicionamiento en vivero, en la cual se generan mecanismos para tolerar las condiciones adversas en el sitio de plantación. En esta fase se pueden manejar factores como la fertilización, el estrés hídrico y las condiciones ambientales (temperatura, luz y humedad) (Escobar, 2012). Aunque en esta fase se recomienda reducir la dosis de nitrógeno y aumentar las de potasio (Vilagrosa *et al.*, 2006), para algunas especies de clima templado frío la fertilización es favorable

ya que promueve la resistencia a heladas (Dumroese, 2003) y propicia la concentración de nutrientes, lo que evita pérdidas de éstos por dilución en el follaje (Boivin *et al.*, 2002). En cambio, altas concentraciones de potasio reducen la probabilidad de daño por heladas en tallo, raíz y follaje en *Pinus hartwegii* Lindl. (Ramírez y Rodríguez, 2010). Mientras tanto, el estrés hídrico produce cambios en la morfología como es el caso de *Pinus engelmannii* Carr. (Prieto *et al.*, 2004), aunque otras especies responden en forma diferente como *Pinus halepensis* Mill. que resultó ser menos sensible a este factor, ya que influyó menos en la morfología, fisiología y supervivencia de las plantas (Royo y Pardos, 2001).

Durante la producción de planta en vivero, principalmente en la fase de precondicionamiento, es común el uso de malla sombra para controlar las condiciones ambientales (temperaturas, humedad relativa y luz) mediante la reducción de la radiación solar, lo que se traduce en ahorro de agua y otros insumos en los riegos (Jacobs *et al.*, 2009). Sin embargo, existe controversia sobre su utilidad en términos de calidad de planta, debido a que en algunas especies favorece la morfología de la planta Khan *et al.* (2000), mientras que en otras afecta las relaciones hídricas (Pardos *et al.*, 2005).

Pinus engelmannii Carr. es una de las especies con mayor valor comercial en el norte de México, tanto por su aprovechamiento maderable como por su uso en plantaciones de restauración de sitios degradados (Prieto *et al.*, 2011) y en años recientes se produce plántulas a gran escala en sistemas tecnificados para plantaciones con fines comerciales (Mejía *et al.*, 2011). En el estado de Durango, el precondicionamiento de la planta se realiza fundamentado en experiencias de los viveristas, sin considerar el tipo de especie, las dosis de fertilización, el efecto de la luz y la interacción de ellos. Por lo anterior, es necesario contar con información documentada que definan las formas de precondicionamiento, así como con la evaluación del efecto de esos factores en la supervivencia y crecimiento de las plantas en el sitio de plantación durante los primeros años, con la finalidad de apoyar la toma de decisiones en la producción de planta.

El objetivo del presente estudio fue evaluar el efecto de cuatro condiciones ambientales (invernadero, intemperie, malla sombra y malla sombra más intemperie) y tres niveles de fertilización (dosis alta, baja y sin fertilización) durante el precondicionamiento en vivero sobre la supervivencia y crecimiento de *Pinus engelmannii* a los 28, 40 y 52 meses de plantado. La hipótesis fue que la fertilización y las condiciones ambientales aplicadas durante la fase de

preacondicionamiento así como el efecto combinado de éstas, favorecen la supervivencia y crecimiento inicial de *P. engelmannii* en campo.

3.2. MATERIALES Y MÉTODOS

3.2.1. Localización del vivero

La planta utilizada se produjo en el “Vivero Forestal Francisco Villa”, localizado en el Ejido 15 de Septiembre, Durango, Dgo., ubicado en las coordenadas 23° 58' 20.38'' N y 104° 35' 55.83'' O, a una altitud de 1875 m. El clima en el área es del tipo Bs₁kw (e), correspondiente a clima seco con lluvias en verano e inviernos fríos (García, 1981). La temperatura media anual es de 17.1°C, el mes más frío es enero con una temperatura media de 11.0 °C y el mes más cálido es junio con una temperatura media de 22.4 °C (Medina *et al.*, 2005).

3.2.2. Condiciones de producción

La planta se produjo en un invernadero de 8 x 60 m cubierto con plástico de polietileno calibre 720, protegido con malla sombra al 60 % y cortinas laterales enrollables las cuales ayudaban a contrarrestar los extremos de temperatura y humedad. Se utilizó semilla de *Pinus engelmannii* Carr. recolectada en rodales naturales en el Ejido San Isidro, municipio de Durango, Dgo. La siembra se realizó el 7 de noviembre del año 2008. Previo a la siembra la semilla se remojó durante 24 horas y se desinfectó por 5 min en una solución compuesta por 90 % de agua y 10 % de cloro comercial. De manera preventiva, para evitar el ataque de *Damping off*, durante las primeras semanas se aplicó Captan[®] en dosis de 2.5 g L⁻¹.

Para la producción se utilizaron charolas de poliestireno Copperblock[®] de 77 cavidades, con capacidad de 170 cm³ por cavidad. Como sustrato se utilizó una mezcla de turba al 50 %, vermiculita al 24 % y agrolita al 21 %, a la cual se le agregó el fertilizante de liberación controlada Osmocote[®] a razón de 5 kg m⁻³. Además, se aplicó fertilizante soluble en agua: durante la fase de establecimiento con Peters Professional Iniciador[®] (7:40:17 N-P-K) en dosis de 40 a 70 ppm de nitrógeno y en la fase de crecimiento rápido se usó Peters Profesional Desarrollo[®] (20:7:19 N-P-K) en dosis de 100 a 200 ppm de nitrógeno.

3.2.3. Preacondicionamiento de la planta

A los siete meses de edad (25 de mayo de 2009) se seleccionó un lote homogéneo de plantas para formar 36 unidades experimentales (2772 plantas). Se colocaron nueve charolas (693 plantas) por cada condición ambiental (invernadero, intemperie, malla sombra y malla sombra más intemperie). Dentro de cada condición ambiental se aplicaron tres niveles de fertilización (dosis alta 70:191:508, baja 35:95:254) de Peters Professional Finalizador® (4-25-35 N-P-K) y un testigo (sin fertilización), ambas con cada nivel se compuso de tres charolas (231 plantas). Los tratamientos se distribuyeron en un diseño completamente al azar, con un arreglo factorial 4 x 3 con tres repeticiones por tratamiento, los cuales se aplicaron durante 64 días (Cuadro 3.1).

Cuadro 3.1. Tratamientos aplicados en el preacondicionamiento de plántulas de *Pinus engelmannii* Carr. con la combinación de condición ambiental y fertilización durante 64 días.

Tratamiento	Factores		Clave
	Condición ambiental	Dosis de fertilización (ppm N-P-K)	
1	Invernadero	Sin fertilización	INV + F0
2	Invernadero	35:95:254	INV + F1
3	Invernadero	70:191:508	INV + F2
4	Intemperie	Sin fertilización	INT + F0
5	Intemperie	35:95:254	INT + F1
6	Intemperie	70:191:508	INT + F2
7	Malla sombra al 60 %	Sin fertilización	MS + F0
8	Malla sombra al 60 %	35:95:254	MS + F1
9	Malla sombra al 60 %	70:191:508	MS + F2
10	Malla sombra al 60 % + Intemperie	Sin fertilización	MI + F0
11	Malla sombra al 60 % + Intemperie	35:95:254	MI + F1
12	Malla sombra al 60 % + Intemperie	70:191:508	MI + F2

INV = Invernadero; INT = Intemperie; MS = Malla Sombra; MI = Malla Sombra más Intemperie (un mes en cada condición); F0 = sin fertilización; F1 = dosis baja; F2 = dosis alta.

Después del periodo de preacondicionamiento se evaluaron las características morfológicas de las plantas por cada tratamiento. Para ello, se realizó un muestreo destructivo. Se extrajeron en forma aleatoria ocho plantas de la parte central, por cada unidad experimental, a las cuales se les midió la altura de la parte aérea (cm) y diámetro del cuello de la raíz (mm). Posteriormente se secaron por separado la parte aérea y radical en una estufa a 70 °C durante 72 horas. Después, con la ayuda

de una balanza se obtuvieron los valores de biomasa seca de la parte aérea, del sistema radical y total (g) y se calcularon el índice de robustez (relación entre la altura y el diámetro del cuello) e índice de calidad de Dickson (Thompson, 1985). Con estos valores se determinaron los promedios por cada tratamiento previo al establecimiento de las plantas en campo. Adicionalmente, con las muestras destructivas se realizaron análisis foliares para determinar las concentraciones de N P y K en el follaje de las plantas (Cuadro 1,2 y 3 del Anexo).

3.2.4. Localización del sitio de plantación

El experimento se estableció en un predio particular localizado a 58 Km de la ciudad Durango, Dgo, México, en las coordenadas geográficas 23°56'44.01" N y 105°04'50.90" O, a una altitud de 2544 m (Figura 3.1). El clima de área es C (w₀) correspondiente a templado subhúmedo (García, 1981). La precipitación media anual es de 754 mm, mientras que la temperatura media anual es de 11 °C. El mes más frío es enero con una temperatura media de 6 °C mientras que el mes más cálido es junio con una temperatura media de 15.9 °C (Medina *et al.*, 2005) (Figura 3.2).

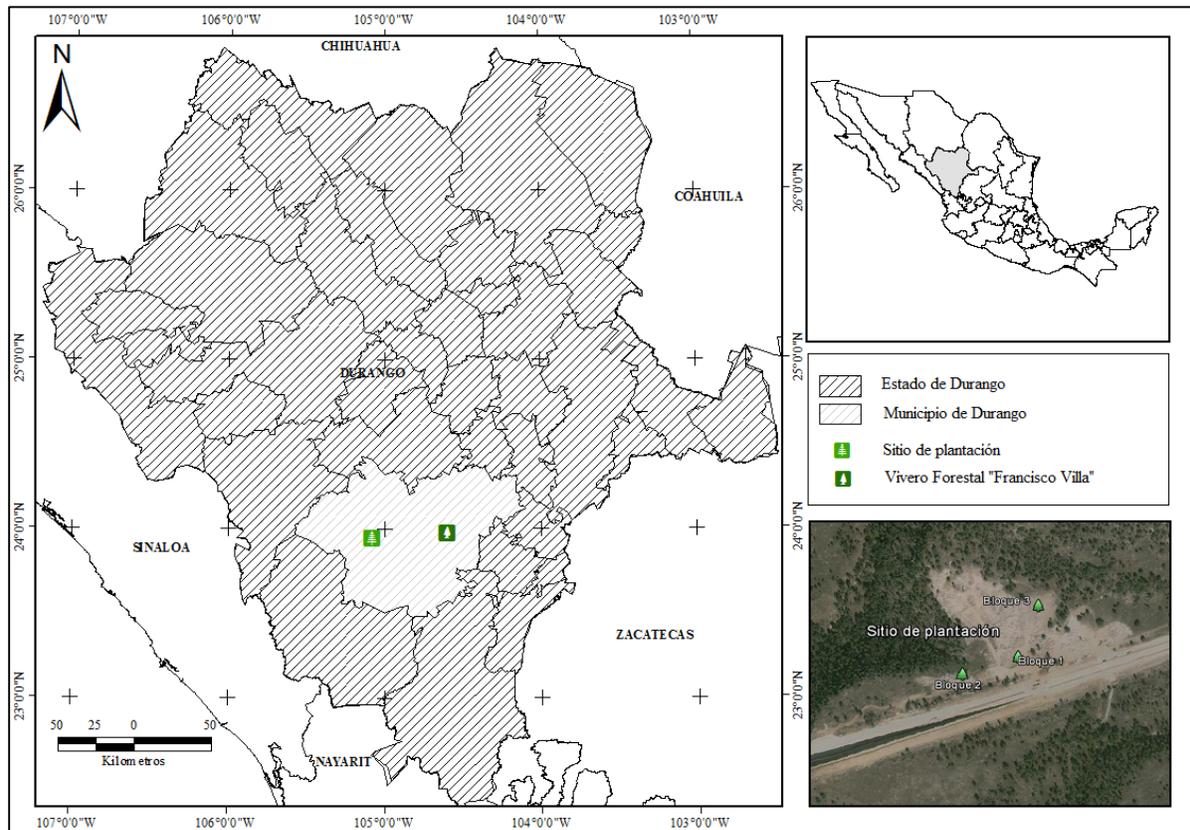


Figura 3.1. Ubicación geográfica del área de investigación.

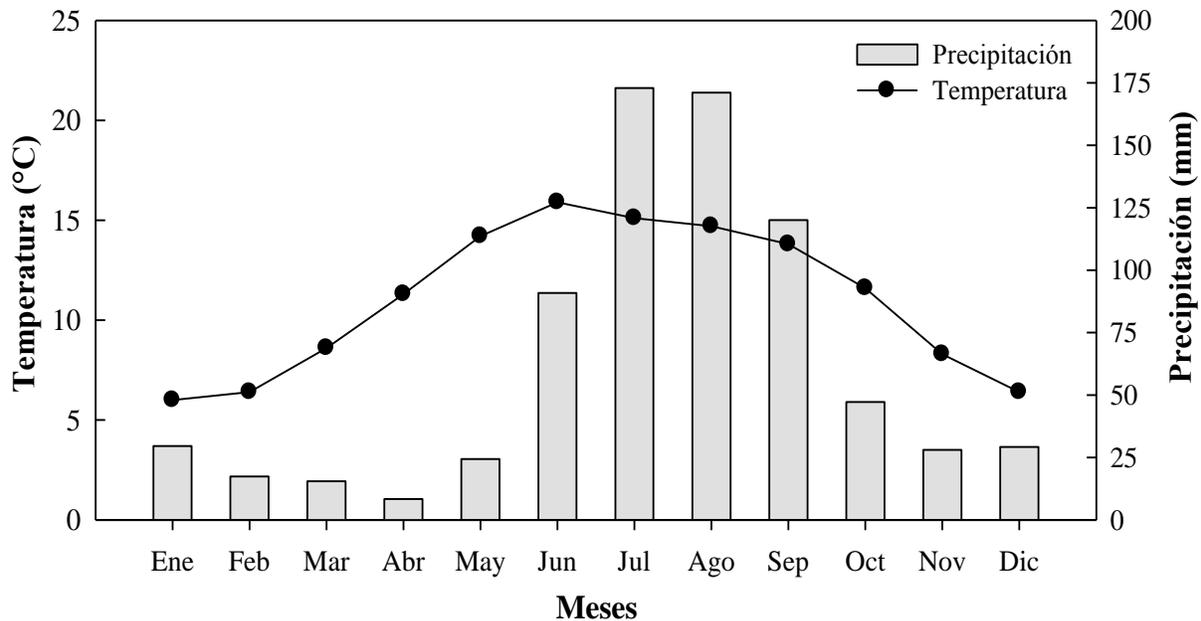


Figura 3.2. Distribución de la temperatura y precipitación promedio en la estación Navíos Viejos, Durango, Dgo. Fuente: elaboración propia modificado de Medina *et al.* (2005).

3.2.5. Características del sitio de plantación

La vegetación arbórea está compuesta por bosque mixto. Las especies dominantes son *Pinus cooperi* Blanco, *P. engelmannii*, *P. teocote* Schiede *ex* Schltdl. y *P. durangensis* Mart., *P. leiophylla* Schltdl. & Cham., *Quercus* spp. *Arbutus* ssp. y *Juniperus deppeana* Steud, mientras que en el estrato arbustivo coexisten *Arthostaphylos pungensis* Kunth y especies arbustivas de *Quercus* spp., además, en el estrato herbáceo existen algunos pastos. En dos de los tres sitios de plantación se tiene una pendiente ligera menor al 3 %, mientras que en el tercer sitio se tiene una pendiente 8-5 % con exposición sur.

Los suelos son luvisoles someros y pedregosos y la textura varía de franco a franco arcilloso (INEGI, 2003). En general, la calidad del suelo fue mala, con condiciones de suelo mineral expuesto debido a que en algunas partes del sitio de plantación la capa superficial de suelo fue removida ya que este sitio se utilizó durante algunos años como banco de materiales. Sin embargo, se extrajeron tres muestras compuestas en cada sitio a una profundidad de 30 cm y se enviaron al Laboratorio de Análisis de Suelo y Tejidos Vegetales del Colegio de Postgraduados donde se realizó la caracterización físico-química del suelo (Cuadro 3.2.).

Cuadro 3.2. Propiedades físico-químicas del suelo en los sitios de plantación para *Pinus engelmannii* Carr.

Propiedades	Sitio		
	1	2	3
pH	5.12	5.43	5.32
Conductividad eléctrica (dS m ⁻¹)	0.016	0.018	0.013
Materia orgánica (%)	1.70	2.38	1.40
Nitrógeno (%)	0.074	0.091	0.077
Fósforo (ppm)	3.60	5.19	5.19
Potasio (meq/100g)	0.29	0.34	0.39
Densidad aparente (g/cm ³)	1.26	1.21	1.20
Arcillas (%)	25.91	22.84	32.66
Limos (%)	36.39	37.01	42.01
Arenas (%)	37.70	40.15	25.33
Textura	Franco	Franco	Franco arcilloso

Fuente: Laboratorio de Suelos y Tejidos Vegetales. Colegio de Postgraduados

3.2.6. Establecimiento de la plantación

Se seleccionó un área donde los programas operativos han tenido resultados insatisfactorios, y que reuniera la superficie y las condiciones de suelo necesarias para los propósitos del experimento. La plantación se estableció durante el período de lluvias, los días 1 y 2 de septiembre de 2009. El experimento requirió el uso de 600 plantas. Las parcelas o unidades experimentales estuvieron compuestas por 15 ó 20 plantas de una muestra seleccionada de los tratamientos generados en vivero (Cuadro 3.1). El experimento incluyó un total de 36 unidades experimentales. Las plantas se establecieron a un espaciamiento de 2 x 2 m sobre las líneas trazadas. Se utilizó el método de cepa común, con un tamaño promedio de 25 x 25 x 25 cm; sin embargo, no se realizó preparación del terreno adicional. Se utilizó un diseño experimental de bloques en parcelas divididas con tres repeticiones. La parcela grande en cada sitio correspondió al factor condición ambiental y la parcela chica a los niveles de fertilización.

3.2.7. Variables evaluadas en campo

Se realizaron evaluaciones a los 28, 40 y 52 meses después de establecida la plantación, durante la época de latencia de las plantas. Se evaluó la supervivencia, para lo cual se asignaron valores de 0 a las plantas que mostraban evidencia de mortalidad visible en todas las acículas y valores de 1 a las plantas que tuvieran al menos un brote vivo. Para evaluar el crecimiento se midió la altura (cm) en cada planta viva, medida desde la base del tallo hasta la yema apical. El diámetro (mm) se midió en la base de la planta con un vernier digital.

3.2.8. Análisis estadístico

El análisis de supervivencia se realizó mediante regresión logística binaria, con el procedimiento LOGISTIC del paquete estadístico SAS, versión 9.0 (SAS Institute, 2002), con el cual se determinó la significancia de los tratamientos en la variable dependiente binomial al momento de cada una de las evaluaciones, en función del bloque, condición ambiental, fertilización así como por la interacción de la condición ambiental y la fertilización como variables explicativas. Cuando se encontró significancia estadística ($p \leq 0.05$) debido al efecto de los factores evaluados, se realizaron comparaciones por pares entre los porcentajes de supervivencia, mediante la corrección de Bonferroni, la cual ajusta el nivel de significancia para múltiples comparaciones, mediante la división de éste entre el número de posibles comparaciones (Sit, 1995). El modelo utilizado está representado por la siguiente expresión (Hosmer y Lemeshow, 2000):

$$P = 1/1+e^{-(\alpha_0+\beta_1X_1 +\beta_2X_2+\beta_3X_3+\beta_4X_4)}$$

Donde: P = Probabilidad de supervivencia; e = base de los logaritmos naturales (2.7182); $\alpha, \beta_1, \dots, \beta_n$ = parámetros del modelo; variables independientes; X_1 =bloque; X_2 = condición ambiental; X_3 = fertilización; X_4 = condición ambiental*fertilización.

Para estimar las variables de crecimiento (altura y diámetro), se realizaron análisis de varianza en cada una de las evaluaciones (28, 40 y 52 meses). Previo a ello se validaron los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas, cuando alguno de éstos no se cumplió en alguna variable, ésta se transformó mediante logaritmos naturales. Una vez comprobados los supuestos se realizaron los análisis de varianza utilizando el procedimiento MIXED del paquete SAS, versión

9.0 (SAS Institute, 2002); cuando existieron diferencias significativas ($p \leq 0.05$) en las fuentes de variación, se realizaron comparaciones de medias ajustadas mediante la instrucción LSMEANS. El diseño experimental utilizado fue en parcelas divididas y está representado por el siguiente modelo:

$$Y_{ijkl} = \mu + S_i + C_j + E_{ij} + F_k + (CF)_{jk} + e_{ijkl}$$

Donde: Y_{ijkl} = Variable respuesta; μ = Efecto medio general; S_j = Efecto del i-ésimo sitio; C_j = Efecto de la j-ésima condición ambiental; E_{ij} = Error aleatorio en la parcela grande; F_k = Efecto del k-ésimo nivel de fertilización; $(CF)_{jk}$ = Efecto de la interacción entre la j-ésima condición ambiental y el k-ésimo nivel de fertilización; e_{ijkl} = Error aleatorio en la parcela chica.

3.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.3.1. Supervivencia

A los 52 meses de establecida la plantación la supervivencia general era de 53 %, y la mayor mortalidad ocurrió entre los 28 y 40 meses (15 %), mientras que entre los 40 y 52 meses fue menor (4 %). La mortalidad ocurrida entre los 28 y 40 meses se puede asociar a la sequía atípica del verano del año 2012 en comparación con el 2013, en el que las precipitaciones se presentaron de manera regular en la región. El resto de la mortalidad ocurrió a partir de que se plantó hasta los 28 meses de establecida.

Se encontraron diferencias significativas ($p \leq 0.05$) en la supervivencia de *P. engelmannii* a los 28, 40 y 52 meses de establecida en campo, debido a las condiciones ambientales aplicadas durante el precondicionamiento en vivero. En cambio, el factor fertilización no afectó significativamente ($p \geq 0.05$) la supervivencia en los periodos evaluados. Por otro lado, el efecto combinado de la fertilización y la condición ambiental sólo mostró diferencias significativas a los 52 meses de establecida la plantación (Cuadro 3.3).

Cuadro 3.3. Significancia estadística para la supervivencia de *Pinus engelmannii* Carr. a los 28, 40 y 52 meses de plantado, en respuesta a cuatro condiciones ambientales y tres niveles de fertilización aplicados durante la fase de precondicionamiento en vivero.

Factor	Tiempo (meses)		
	28	40	52
Sitio	0.0242	0.0001	0.0001
Condición Ambiental	0.0002	0.0001	0.0001
Fertilización	0.7438	0.8960	0.9281
CA*F	0.0971	0.0812	0.0489

CA= Condición ambiental; F=Fertilización.

3.3.1.1. Supervivencia por condición ambiental

En general, los tratamientos que sobresalieron con los mejores porcentajes de supervivencia fueron los de intemperie y malla sombra, mientras que los más bajos se obtuvieron en las condiciones de invernadero, seguido por el de malla sombra más intemperie; esta tendencia prevaleció entre los 28 y 52 meses después de establecidos los individuos en campo (Figura 3.3).

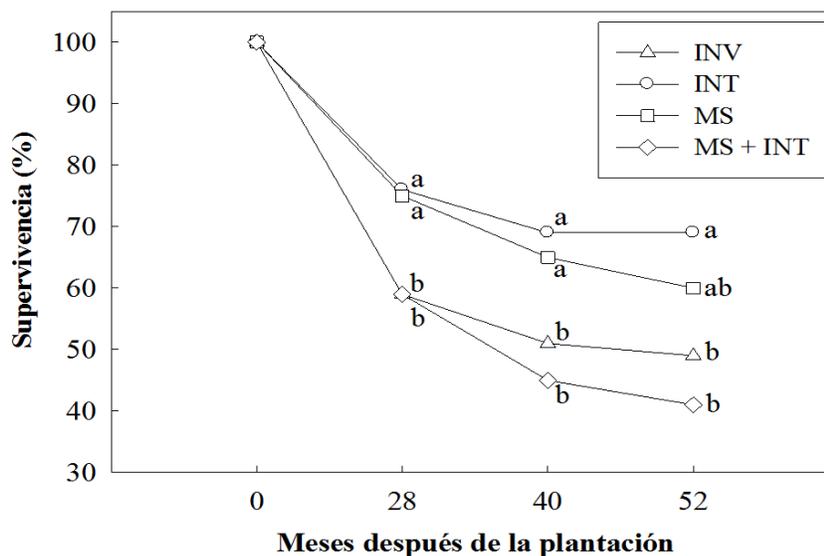


Figura 3.3. Supervivencia de *Pinus engelmannii* Carr. a los 28, 40 y 52 meses de plantado, en respuesta a cuatro condiciones ambientales aplicadas durante la fase de precondicionamiento en vivero. INV= Invernadero; INT= Intemperie; MS = Malla Sombra; MS + INT = Malla Sombra más Intemperie (un mes en cada condición).

La supervivencia a los 28 meses fue mejor en las plantas que permanecieron en la condición de intemperie y en malla sombra durante el preacondicionamiento con porcentajes de 76 y 75 % respectivamente, comparadas con las que permanecieron en la condición de invernadero y malla sombra más intemperie, obteniéndose en ambas 59 % de supervivencia. En el caso de las siguientes evaluaciones a los 40 y 52 meses se presentó la misma tendencia que a los 28 meses; es decir, sobresalieron las plantas que estuvieron en intemperie y en malla sombra (Figura 3.3).

Como se esperaba, las plantas que estuvieron en condiciones de intemperie durante el preacondicionamiento, produjeron los mejores niveles de supervivencia en campo, debido a que éstas sufrieron cierto nivel de estrés hídrico, como respuesta a pérdidas de humedad en el sustrato por altos niveles de radiación solar, temperatura y humedad relativa, lo que promovió la lignificación de los tallos; así mismo, mejoró la eficiencia hídrica, al disminuir su crecimiento en altura e incrementar el diámetro y la biomasa radical. Estas características, según Rodríguez (2008) son deseables en reforestaciones de sitios con características edafoclimáticas adversas.

En el caso de la planta que se preacondicionó en malla sombra durante dos meses, se esperaba tener menores porcentajes de supervivencia, debido a que por lo general las especies del género *Pinus* son intolerantes a la sombra; es decir, bajo ciertos niveles de luminosidad se reduce la tasa de fotosíntesis (Pallardy, 2008), lo que afecta las características morfofisiológicas de las plantas. Sin embargo, en este estudio los niveles de supervivencia fueron similares a los de intemperie, lo cual se podría explicar debido a que el nivel de sombra fue moderada (60 %), lo que no limitó su eficiencia fotosintética y permitió seguir acumulando reservas, para sobrevivir y establecerse en condiciones adversas en campo. Estos resultados coinciden con Puértolas *et al.* (2009), quienes sugieren que para especies intolerantes como *Pinus halepensis* Mill., sólo niveles superiores al 90 % de sombra afectan la morfología y fisiología de las plantas; así mismo, reducen la supervivencia a los dos años de plantado, pero no para especies tolerantes como *Quercus ilex* L.

Los resultados eran de esperarse en las plantas que permanecieron en invernadero durante el preacondicionamiento debido a que existen condiciones ambientales favorables de temperatura y humedad relativa, con lo que se promueve el crecimiento continuo de las plantas, pero al mismo tiempo se limita el proceso de lignificación, por lo que se generan tallos suculentos y alargados, lo cual hace que las plantas sean más vulnerables a daños por estrés hídrico, mecánico y térmico, y produce menores porcentajes de supervivencia en campo (Vilagrosa, 2006).

Finalmente, y contrario a lo esperado las plantas que se preconditionaron un mes bajo malla sombra y un mes a la intemperie, tuvieron los menores niveles de supervivencia, lo cual se podría explicar por el cambio más brusco al pasar de malla sombra a la intemperie en el mes de junio cuando se presentan las temperaturas más elevadas, así como al periodo reducido en que estuvieron a la intemperie en condiciones de alta luminosidad y temperatura, lo cual limitó el proceso de preconditionamiento.

3.3.1.2. Supervivencia por fertilización

Los efectos de las dosis de fertilización aplicadas durante el preconditionamiento en vivero no fueron estadísticamente significativos en la supervivencia, ya que en las tres evaluaciones realizadas no se observó una tendencia en favor de alguna de las dosis de fertilización aplicadas durante la fase de preconditionamiento. Los porcentajes variaron de 66 a 69 % a los 28 meses, de 56 a 58 % a los 40 meses y finalmente de 56 a 54 % en la evaluación final, con una disminución en la supervivencia semejante durante todo el periodo de evaluación (Figura 3.4).

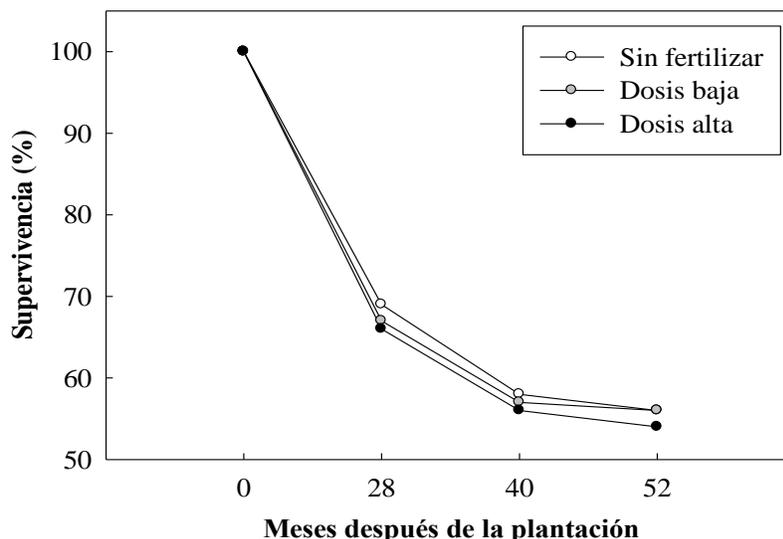


Figura 3.4. Supervivencia de *Pinus engelmannii* Carr. a los 28, 40 y 52 meses de plantado, en respuesta a tres niveles de fertilización aplicados durante la fase de preconditionamiento en vivero.

Los resultados de supervivencia por efecto de los niveles de fertilización no concuerdan con lo esperado, debido a que se asumía que las plantas con mayores concentraciones de nitrógeno, fósforo y potasio en el follaje, así como mejores características morfológicas (Cuadro 2 del Anexo)

exhibirían mejores niveles de supervivencia en comparación con las no fertilizadas. Sin embargo, existen estudios como el de Jackson *et al.* (2012) quienes encontraron que las aplicaciones de nitrógeno durante la producción en vivero y parte del preacondicionamiento mejoran el crecimiento, pero no influyen en la supervivencia de *Pinus palustris* a los dos y tres años de establecido en campo. Por el contrario, Luis *et al.* (2009) encontraron que plantas de *Pinus canarensis* C. Smith *ex* Buch con altas concentraciones de nitrógeno mejoran su morfología y sus funciones fisiológicas, lo que resulta en mayores tasas de supervivencia a los dos años de establecido en ambientes semiáridos. Sin embargo, altos niveles de fertilización pueden tener efectos adversos, principalmente cuando se reforesta en sitios áridos, debido a que las plantas de algunas especies que se producen tienen mayor talla, área foliar y acumulación de biomasa aérea en comparación con la parte radical, y en consecuencia baja eficiencia hídrica, lo cual limita su resistencia al estrés y disminuye sus posibilidades de sobrevivir en campo (Trubat *et al.*, 2011).

En diversos estudios se ha reportado la importancia del potasio en el preacondicionamiento de las plantas tanto en el estrés hídrico como en la resistencia a daños por heladas. Tal es el caso de Ramírez y Rodríguez (2010), quienes afirman que conforme se aumenta el nivel de potasio durante el preacondicionamiento se reduce la probabilidad de daños por heladas en raíz y follaje en *Pinus hartwegii* Lindl.

3.3.1.3. Interacción condición ambiental*fertilización

Al analizar el efecto combinado de la condición ambiental*fertilización sólo se encontraron diferencias significativas ($p \leq 0.05$) a los 52 meses de establecida; sin embargo, existió una tendencia de mayor supervivencia en los tratamientos de malla sombra más fertilización y el de intemperie más dosis alta con 55 y 57 % de supervivencia con respecto a los tratamientos de invernadero más dosis de fertilización alta y malla sombra más intemperie sin fertilización. Esta tendencia persistió hasta los 40 meses, donde sobresalieron los mismos tratamientos que en la primera evaluación. Después de 52 meses de establecida la plantación los mejores tratamientos fueron los de intemperie más dosis alta, intemperie más dosis baja y los de malla sombra con dosis alta y malla sombra con dosis baja, mientras que los menores niveles de supervivencia se encontraron en malla sombra más intemperie con o sin fertilización (Figura 3.5).

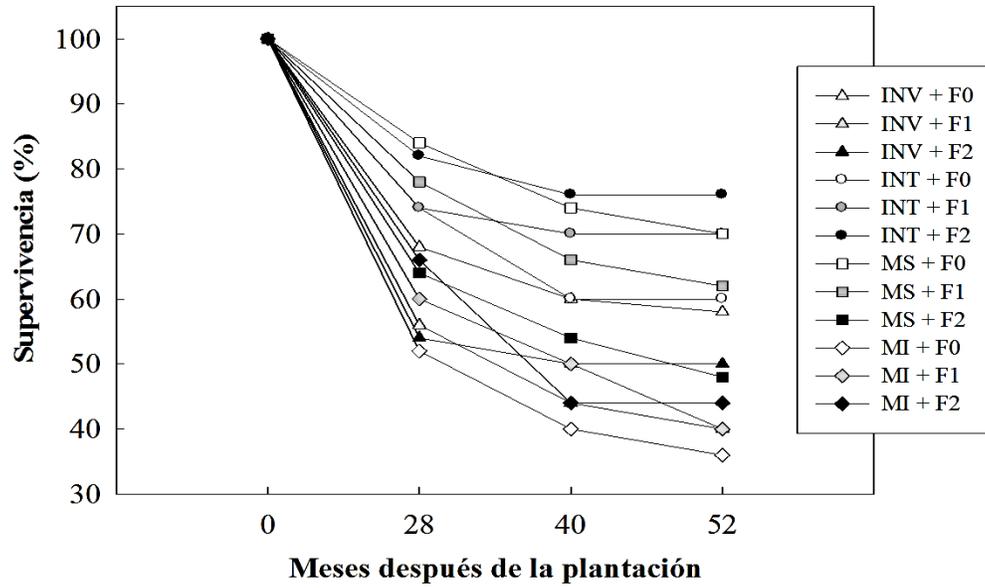


Figura 3.5. Supervivencia de *Pinus engelmannii* Carr. a los 28, 40 y 52 meses de plantado, en respuesta a la interacción condición ambiental*fertilización, aplicada durante la fase de precondicionamiento en vivero. INV = Invernadero; INT = Intemperie; MS = Malla Sombra; MS+INT = Malla Sombra más Intemperie (un mes en cada condición). F0 = Testigo (sin fertilización); F1 = Dosis baja; F2 = Dosis alta.

Aunque en este trabajo se presentan resultados no significativos en la supervivencia para la fertilización y de forma poco contundente en la interacción condición ambiental*fertilización, durante el periodo de evaluación sería recomendable realizarlos también durante los dos primeros años de establecido en campo, para evaluar posibles tendencias en función de algunos de los factores evaluados. Lo anterior debido a que representa la etapa más crítica para el establecimiento de las plantas pues aumenta el grado de exigencia para tolerar el estrés. Oliet *et al.* (2009) sugieren que los tratamientos basados en fertilización aplicados en vivero, pueden marcarse diferencias hasta después de varios años, inclusive después de periodos de sequía severa.

Otros factores que probablemente influyeron en la supervivencia de las plantas, fueron las condiciones del micrositio aunado al tamaño inicial de las plantas al momento de plantar, lo que genera competencia y en consecuencia afecta la supervivencia (Ramírez y Rodríguez, 2004). Por otro lado, las variaciones de las propiedades fisicoquímicas del suelo, también pudieron haber afectado tanto en la supervivencia como el crecimiento de las plantas debido a que éstas características influyen en la absorción de agua y nutrientes disponibles en el suelo. Sin embargo,

en este estudio estas no fueron contrastantes, debido a que los sitios de plantación se encontraban muy cercanos entre sí (Cuadro 3.2).

3.3.2. Crecimiento en altura y diámetro

De acuerdo con los resultados de los análisis de varianza, la altura mostró efecto significativo del sitio hasta los 52 meses ($p \leq 0.05$). La condición ambiental tuvo efecto significativo después de 40 meses de establecida ($p \leq 0.05$). El factor fertilización no afectó el crecimiento en altura de las plantas en las evaluaciones realizadas ($p \geq 0.05$). La interacción entre la condición ambiental y la fertilización afectaron el crecimiento en altura a los 28, 40 y 52 meses de establecida. En el caso del crecimiento en diámetro, existieron diferencias significativas para todos los factores evaluados, con excepción de la fertilización donde no hubo efecto significativo ($p \leq 0.05$) durante el periodo de evaluación, lo que persistió desde los 28 hasta los 52 meses de plantado (Cuadro 3.4).

Cuadro 3.4. Significancia estadística para altura y diámetro en *Pinus engelmannii* Carr. a los 28, 40 y 52 meses de plantado, en respuesta a cuatro condiciones ambientales y tres niveles de fertilización aplicados durante la fase de precondicionamiento en vivero.

Factor	Altura			Diámetro		
	28	40	52	28	40	52
Bloque	0.0588	0.1066	0.0020	0.0004	0.0005	0.0001
CA	0.5278	0.0376	0.0101	0.0048	0.0014	0.0011
F	0.5793	0.8131	0.7076	0.8899	0.2738	0.1638
CA* F	0.0025	0.0003	0.0016	0.0046	0.0302	0.0445

CA= Condición Ambiental; F=Fertilización.

3.3.2.1. Crecimiento en altura y diámetro por condición ambiental

A los 28 meses no existió una tendencia del crecimiento en altura de las plantas; sin embargo, los valores fluctuaron de 19.4 a 17.8 cm. En cambio, a los 40 y 52 meses las plantas precondicionadas a la intemperie en vivero crecieron 28 y 35 % respectivamente, más que las precondicionadas en malla sombra más intemperie. El diámetro fue menos sensible a los tratamientos, al mostrar menores incrementos que la altura a los 28, 40 y 52 meses. Las plantas precondicionadas a la intemperie sobresalieron con respecto a las precondicionadas mediante malla sombra más intemperie con incrementos de 20, 22 y 23 %, respectivamente (Cuadro 3.5).

Cuadro 3.5. Valores promedio de altura y diámetro en *Pinus engelmannii* Carr. a los 28, 40 y 52 meses de plantado, en respuesta a cuatro condiciones ambientales aplicadas durante la fase de precondicionamiento en vivero.

CA	Altura (cm)			Diámetro (mm)		
	28	40	52	28	40	52
INV	19.44 ± 0.72 a	35.11 ± 1.75 a	53.31 ± 2.88 a	25.43 ± 0.92 ab	35.90 ± 1.14 a	48.28 ± 1.62 a
INT	19.19 ± 0.53 a	35.61 ± 1.41 a	55.76 ± 2.30 a	27.58 ± 0.67 a	37.24 ± 0.89 a	48.16 ± 1.08 a
MS	18.80 ± 0.58 a	33.54 ± 1.62 a	51.32 ± 2.76 a	25.18 ± 0.73 b	34.81 ± 1.02 a	45.41 ± 1.30 a
MS+I	17.83 ± 0.84 a	27.71 ± 2.32 b	41.13 ± 3.92 b	22.93 ± 1.06 b	30.62 ± 1.46 b	39.62 ± 1.84 b

CA= Condición Ambiental; INV = Invernadero; INT = Intemperie; MS = Malla Sombra; MS+I = Malla Sombra más Intemperie (un mes en cada condición). Letras diferentes para la misma columna son estadísticamente diferentes con ($p \leq 0.05$).

A pesar de que a su salida de vivero las plantas tenían diferencias morfológicas en altura y diámetro, debido a los tratamientos aplicados en la fase de precondicionamiento (Cuadro 1 del Anexo), estas se igualaron después de los primeros 28 meses, lo que pudo ser debido a que *P. engelmannii* tiene hábito de crecimiento cespitoso durante los primeros años de edad.

3.3.2.2. Crecimiento en altura y diámetro por fertilización

La altura y el diámetro a la base presentaron promedios estadísticamente similares para las tres fechas de evaluación en función de los niveles de fertilización (Cuadro 3.6).

Cuadro 3.6. Valores promedio de altura y diámetro en *Pinus engelmannii* Carr. evaluadas a los 28, 40 y 52 meses de plantado, en respuesta a tres niveles de fertilización aplicados durante la fase de precondicionamiento en vivero.

Fert.	Altura (cm)			Diámetro (mm)		
	28	40	52	28	40	52
Testigo	18.33 ± 0.66	32.78 ± 1.74	48.66 ± 2.91	25.27 ± 0.83	34.53 ± 1.03	45.03 ± 1.37
Baja	18.86 ± 0.50	32.77 ± 1.41	50.48 ± 2.45	25.37 ± 0.64	35.04 ± 0.88	45.71 ± 1.15
Alta	19.25 ± 0.59	33.93 ± 1.38	52.90 ± 2.41	25.20 ± 0.75	33.93 ± 0.95	45.69 ± 1.16

A pesar de que las plantas tuvieron diferentes características morfológicas y fisiológicas por efecto de la fertilización después del precondicionamiento en vivero (Cuadro 2 del Anexo), las

diferencias desaparecieron después de los 28 meses de establecida la plantación. Al respecto, Pinto *et al.* (2011) indican que si en el sitio de plantación existen limitaciones de humedad probablemente se mantengan estas diferencias. Por el contrario, Puértolas *et al.* (2003), encontraron una relación directa entre el contenido de nitrógeno, fósforo y potasio en plantas de *Pinus halepensis* Mill. al momento de plantar, con el crecimiento inicial en altura durante los tres primeros años en sitios de clima mediterráneo.

3.3.2.3. Crecimiento en altura y diámetro por interacción condición ambiental*fertilización

Al analizar el efecto combinado de la interacción de la condición ambiental*fertilización en altura, sobresalió el tratamiento de invernadero sin fertilizar con 29 % más de altura con respecto al de menor altura. Después de 40 meses resaltó el mismo tratamiento pero el incremento fue mayor y alcanzó 73 % más altura que el tratamiento con menor altura. Finalmente, a los 52 meses destacó el tratamiento formado por la condición de intemperie más dosis alta de fertilización con incremento de 75 % en esta variable con respecto al de menor altura (Cuadro 3.7).

El diámetro a los 28 meses fue menos sensible al efecto de los tratamientos. A los 28 meses el tratamiento formado por la condición de intemperie más la dosis alta de fertilización incrementó 29 % más en diámetro, con respecto a la de malla sombra más intemperie con dosis baja. Después de 40 meses sobresalieron las plantas preacondicionadas a la intemperie más dosis baja al crecer 31 % más en diámetro que aquellas que estuvieron en malla sombra más intemperie con dosis baja de fertilización. A los 52 meses de establecida la plantación el valor más alto en esta variable se registró en el tratamiento de malla sombra más dosis baja de fertilización con un incremento de 34 % con respecto a las plantas en condición de malla sombra más intemperie y con dosis baja de fertilización (Cuadro 3.7).

Cuadro 3.7. Valores promedio de altura y diámetro en *Pinus engelmannii* Carr. a los 28, 40 y 52 meses de plantado, en respuesta a la interacción condición ambiental*fertilización aplicada durante la fase de preacondicionamiento en vivero.

CA*F	Altura (cm)			Diámetro (mm)		
	28	40	52	28	40	52
INV + F0	21.66 ± 1.09 a	41.43 ± 2.98 a	58.47 ± 4.94 ab	26.57 ± 1.39 bc	36.63 ± 1.88 ab	48.37 ± 2.32 ab
INV + F1	18.37 ± 1.06 b	29.23 ± 3.08 c	43.66 ± 5.31 bc	23.45 ± 1.35 c	31.79 ± 1.93 b	42.83 ± 2.50 ab
INV + F2	18.30 ± 1.54 b	32.76 ± 2.20 bc	49.76 ± 2.27 bc	26.27 ± 1.96 bc	36.95 ± 1.89 ab	47.75 ± 2.37 ab
INT + F0	16.83 ± 0.92 b	30.35 ± 2.54 bc	47.79 ± 4.15 bc	24.91 ± 1.17 bc	35.69 ± 1.60 ab	47.11 ± 1.95 ab
INT + F1	20.25 ± 0.96 ab	36.55 ± 2.55 ab	56.75 ± 4.14 ab	28.73 ± 1.22 ab	38.74 ± 1.60 a	49.18 ± 1.95 ab
INT + F2	20.48 ± 0.87 ab	39.94 ± 2.24 ab	62.73 ± 3.65 a	29.10 ± 1.11 a	37.31 ± 1.41 ab	48.19 ± 1.72 ab
MS + F0	18.40 ± 0.91 b	35.56 ± 2.66 bc	54.89 ± 4.66 ab	28.98 ± 1.16 ab	36.73 ± 1.67 ab	47.44 ± 2.19 ab
MS + F1	19.98 ± 0.91 ab	36.94 ± 2.45 ab	58.06 ± 4.01 ab	26.72 ± 1.16 bc	38.07 ± 1.54 ab	49.94 ± 1.94 a
MS + F2	18.03 ± 1.17 b	28.10 ± 3.27 c	41.01 ± 5.40 c	21.82 ± 1.49 c	29.64 ± 2.06 b	38.86 ± 2.58 b
MI + F0	16.42 ± 2.02 b	23.77 ± 5.14 c	33.49 ± 8.50 c	22.64 ± 2.57 c	29.05 ± 3.24 b	37.20 ± 4.00 b
MI + F1	16.86 ± 1.09 b	28.36 ± 3.15 c	43.43 ± 5.83 bc	22.59 ± 1.39 c	31.55 ± 1.98 b	40.87 ± 2.75 b
MI + F2	20.20 ± 1.02 ab	30.98 ± 3.48 bc	46.48 ± 5.67 bc	23.57 ± 1.29 c	31.24 ± 2.19 b	40.80 ± 2.67 b

CA= Condición Ambiental; INV= Invernadero; INT = Intemperie; MS= Malla Sombra; MS+I= Malla Sombra más Intemperie (un mes en cada condición); F=Fertilización; F0= Sin fertilización; F1= Dosis baja; F2= Dosis alta de fertilizante. Letras diferentes para la misma columna son estadísticamente diferentes con ($p \leq 0.05$).

En general, existió una falta de contundencia en los resultados del presente estudio en favor de alguna interacción en particular, lo que puede deberse a múltiples factores como la competencia con herbáceas, las características fisicoquímicas de los suelos así como a la ligera pendiente que se presentó en uno de los bloques. Aunque los resultados del presente trabajo pueden tener implicaciones prácticas en favor de las labores de reforestación, estos no deben generalizarse, debido a que la respuesta las características morfológicas y fisiológicas pueden variar en función de la especie, de las condiciones de producción, de la ubicación geográfica de cada vivero, y de las condiciones edáficas de los sitios de plantación (Grossnickle, 2012).

3.4. CONCLUSIONES

Los mejores porcentajes de supervivencia de las plantas desde los 28 hasta los 52 meses se encontraron en las preacondicionadas a la intemperie y en malla sombra durante dos meses antes de salir a campo. Los niveles de fertilización no influyeron en la supervivencia de las plantas durante el periodo de evaluación. La combinación de la condición de intemperie más dosis baja de

fertilización produjeron la mayor supervivencia de las plantas a partir de los 52 meses de establecida en campo.

El efecto combinado de la interacción condición ambiental*fertilización afectó el crecimiento en altura y diámetro de las plantas durante las tres evaluaciones, aunque no existió una respuesta contundente en favor de alguno de los tratamientos. Los mejores niveles de altura se registraron cuando la planta estuvo a la intemperie con dosis bajas de fertilización.

CAPÍTULO IV

EFFECTO DE LA CONDICIÓN AMBIENTAL Y LA FERTILIZACIÓN EN EL PREACONDICIONAMIENTO DE *Pinus engelmannii* CARR. EN VIVERO

RESUMEN

El preacondicionamiento tiene como propósito aclimatizar la planta a las condiciones prevalecientes en los sitios de plantación. Se evaluaron las características morfológicas y fisiológicas de *Pinus engelmannii* Carr. durante dos meses, bajo cuatro condiciones ambientales (invernadero, intemperie, malla sombra y malla sombra más intemperie) y un tratamiento adicional (intemperie más un nivel de fertilización de 50 ppm de N, P y K) y su respuesta en campo. Las plantas que permanecieron en intemperie e intemperie más fertilización presentaron los mayores incrementos en biomasa radical y total, en volumen de raíz y en la relación parte aérea/raíz (38, 32, 30 y 28 %), respectivamente ($p \leq 0.05$). El diámetro del tallo y la biomasa aérea fueron menos sensibles al incrementarse solo 18 y 6 %, respectivamente en los mismos tratamientos. Los tratamientos de intemperie más fertilización y de invernadero ocasionaron mayores aumentos en la concentración y contenido de nutrimentos en el follaje. La concentración de nitrógeno fue 30 % mayor en el tratamiento de intemperie con fertilización en comparación con intemperie sin fertilización; la concentración de fósforo fue 57 y 43 % y la de potasio 42 y 58 % mayor en esos tratamientos, respectivamente, con relación al de intemperie sin fertilización. El potencial de crecimiento radical fue mayor en el tratamiento de intemperie con incrementos de 67 % en número, 53 % en longitud y 35 % en biomasa de raíces nuevas con respecto al tratamiento de invernadero. Después de 120 días en campo sólo se detectaron diferencias en la tasa relativa de crecimiento ($p \leq 0.05$). La mejores características morfológicas y fisiológicas de calidad de planta se obtienen cuando las plantas se preacondicionan a la intemperie durante dos meses sin fertilización. En campo, se recomienda evaluar por periodos más largos para que las plantas expresen mecanismos de resistencia a condiciones de estrés.

Palabras clave: *Pinus engelmannii*, calidad de planta, fisiología, morfología, nutrimentos

ENVIRONMENTAL CONDITION AND FERTILIZATION EFFECT ON *Pinus engelmannii* CARR. HARDENING IN NURSERY

SUMMARY

The hardening stage in nursery has the purpose to acclimatize seedlings to harsh conditions of the planting site. We evaluated morphological and physiological characteristics on *Pinus engelmannii* Carr. during hardening stage in nursery under four environmental conditions (greenhouse, outdoor, shadecloth and outdoor and shadecloth combination) and an additional treatment (outdoor condition with a fertilization level of 50 ppm of N, P and K) and its outplanting performance. After two months of hardening, seedlings exposed to outdoor condition and outdoor plus fertilization had the greatest increments of root and total dry biomass, root volume and shoot/root ratio (38, 32, 30 and 28 %) respectively ($p \leq 0.05$). Root collar diameter and aboveground biomass were least sensitive showing only 18 and 6 % increases, respectively. The highest increases of nutrient concentration and content in the leaves were under outdoor plus fertilization and greenhouse conditions. Nitrogen concentration was 30 % higher in outdoor plus fertilization condition compared to outdoor without fertilization; phosphorus concentration was 57 % and 43 % and the potassium was 42 and 58 % higher in the same treatments. Root growth potential was higher in the outdoor condition with 67 % in number, 53 % length and 35 % root dry biomass of new roots compared to greenhouse condition. After 120 days on the field, only relative rate growth was affected by the hardening treatments ($p \leq 0.05$). The best morphological and physiological characteristics of seedlings was achieved when these were hardened at outdoor condition during two months. Field performance should be evaluated for longer time periods, in order to seedlings can express tolerance mechanisms to stress conditions.

Key words: *Pinus engelmannii*, Seedling quality, morphology, nutrients, physiology.

4.1. INTRODUCCIÓN

En años recientes, en México se han impulsado programas de reforestación a gran escala. Pese a ello, los porcentajes de supervivencia aún son reducidos, lo cual se atribuye a causas diversas, entre las que sobresale la baja calidad de la planta (Wightman y Santiago, 2003; Mexal *et al.*, 2008). Cuando se utiliza planta con atributos morfológicos y fisiológicos apropiados, aumentan las expectativas de supervivencia y establecimiento en campo (Grossnickle, 2012).

Las prácticas culturales en vivero condicionan las características funcionales de las plantas y su desempeño en campo (South, 2000). En coníferas, la fertilización promueve el crecimiento de nuevas raíces, al mismo tiempo que mejora la capacidad de supervivencia y crecimiento inicial de las plantas en sitios con competencia (Cuesta *et al.*, 2010). Sin embargo, niveles altos de nitrógeno también pueden reducir la tolerancia a la sequía y la acumulación de biomasa radical, e incrementar el área foliar, la altura de la planta y la relación biomasa aérea/biomasa radical, las vuelve más vulnerables al estrés (Berguer y Glatzel, 2001).

Durante el proceso de producción de planta es común el uso de malla sombra, lo que operativamente aporta beneficios al regular el ambiente de producción así como ahorro de agua (Landis, 1992; Jacobs y Landis, 2009). No obstante, existe controversia sobre su utilidad, principalmente en la fase de precondicionamiento, debido a su efecto en la calidad de planta, ya que por un lado reduce el daño en el follaje por excesos de calor y alta radiación solar durante el verano y, por otro, induce respuestas morfológicas negativas en especies que requieren altos niveles de luz para crecer eficientemente (Puértolas *et al.*, 2009), al mismo tiempo que afecta las relaciones hídricas (Pardos *et al.*, 2005).

La fase de precondicionamiento de las plantas, previo a su salida de vivero, es una etapa crítica en el proceso de producción, cuyo propósito es precondicionar las plantas a las condiciones adversas presentes en los sitios de plantación (Jacobs y Landis, 2009). Lo anterior se puede lograr mediante un manejo adecuado del estrés hídrico, fertilización, reducción de fotoperiodo, alteraciones de temperatura, exposición al sol, o combinaciones entre éstas. La intensidad y duración del proceso de precondicionamiento depende de las condiciones del sitio y de la especie a producir (Escobar, 2012).

En muchos viveros forestales de México el preacondicionamiento se realiza mediante fertilización con bajos niveles de nitrógeno y altos de fósforo y potasio, al mismo tiempo que se elimina la condición de invernadero y se exponen las plantas a condiciones ambientales semejantes a las de campo, lo cual incluye exposición a pleno sol o malla sombra al 60 % y se restringen los riegos. Sin embargo, la mayoría de estas prácticas son empíricas y en muchos casos se basan en experiencias de otros países, por lo que existen pocos trabajos documentados que aborden aspectos de preacondicionamiento en especies mexicanas de clima templado frío.

Pinus engelmannii Carr. sobresale en el norte de México por su amplia distribución natural en los bosques de clima templado frío (González *et al.*, 2007), y es de las especies más empleadas en los programas de reforestación en esa región (Prieto *et al.*, 2012). En este contexto, el objetivo del presente estudio fue evaluar el efecto de cuatro condiciones ambientales (invernadero, intemperie, malla sombra y malla sombra más intemperie) y un tratamiento adicional que consistió en la condición de intemperie más fertilización, en las características morfológicas y fisiológicas de *Pinus engelmannii* Carr. en vivero, así como su respuesta en campo.

4.2. MATERIALES Y MÉTODOS

4.2.1. Localización del área de estudio

El estudio se realizó en el vivero forestal del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Texcoco, Estado de México, ubicado en las coordenadas 19° 27' 37.02" N y 98° 54' 24.02" O, y a 2247 m de altitud. El clima del lugar es del tipo C (Wo) (w)b(1)g que corresponde al templado subhúmedo con lluvias en verano, con una temperatura media anual de 15 °C y una precipitación media anual de 750 mm, con una oscilación térmica de 5 a 7 °C (García, 1981).

4.2.2. Condiciones de producción

Se utilizó semilla de *Pinus engelmannii* Carr. recolectada en rodales semilleros del ejido San Isidro, Municipio de Durango, Dgo. El sustrato consistió en una mezcla de 70 % corteza de pino compostada, 10 % turba, 10 % agrolita y 10 % vermiculita. Se utilizaron contenedores individuales (tubetes) de polipropileno de 220 cm³. Al momento de realizar la mezcla de sustrato se agregaron 7 kg m⁻³ de fertilizante de liberación controlada Osmocote Plus® 15-9-12 (N-P-K), de nueve meses, así como *Trichoderma* sp. y *Basilus thuringesnsis* en dosis de 5 g m⁻³ como control biológico

preventivo ante plagas y enfermedades. La semilla se remojó en agua durante 24 h para uniformizar y acelerar la germinación, previo a la siembra, la cual se realizó el 21 de septiembre de 2012, poniendo dos semillas por cavidad; la germinación ocurrió tres semanas después. Los riegos fueron diarios y ligeros desde la siembra, para mantener el agua de riego con un pH de 6 se añadió ácido fosfórico (H₃PO₄) al 85 %. La planta permaneció en invernadero durante siete meses (del 21 de septiembre de 2012 al 15 de mayo del 2013) hasta el inicio del precondicionamiento. Durante la fase de desarrollo rápido se aplicó en el riego fertilizante soluble Peters Profesional desarrollo[®], formulación de 20-20-20 de N-P-K en dosis de 100 ppm, dos veces por semana durante el último mes previo al inicio del precondicionamiento. En marzo del 2013 hubo presencia de *Fusarium*, el cual se controló con aplicaciones de Tecto 60[®], Captan[®] y Previcur[®] (2 g L⁻¹), aplicada cada semana con una mochila aspersora durante un mes. Durante el precondicionamiento se registraron las variables microclimáticas de temperatura (°C), humedad relativa (%) y radiación (lux) en cada condición ambiental con un data logger tipo HOBO U12 (Onset[®] Bourne, MA.) (Cuadro 4.1).

Cuadro 4.1. Valores promedio de las variables microclimáticas en la producción de *Pinus engelmannii* Carr.

Condición ambiental	Temperatura (°C)			Humedad relativa (%)			Intensidad de luz (lux)		
	Máx.	Mín.	Media	Máx.	Mín.	Media	Máx.	Mín.	Media
Invernadero	37.5	11.5	21.2	90.3	26.6	63.6	24244.9	11.6	6 847.6
Intemperie	31.2	10.6	19.0	88.1	30.9	63.2	27840.4	11.1	6 288.0
Malla Sombra	27.5	11.6	17.9	67.1	35.9	53.6	13231.9	15.9	2 971.9

4.2.3. Tratamientos de precondicionamiento

Los tratamientos durante la fase de precondicionamiento se aplicaron del 15 de mayo al 15 de julio de 2013 y consistieron en exponer las plantas a cuatro condiciones ambientales y un tratamiento adicional en el cual se combinó el efecto de la condición de intemperie con una dosis de fertilizante soluble Peters Profesional Finalizador[®] 4-25-35 como fuente de N, P y K (Cuadro 4.2). Cada tratamiento estuvo compuesto por cuatro repeticiones de 25 plantas, (100 plantas por tratamiento), teniendo un total de 500 plantas en el experimento.

Cuadro 4.2. Tratamientos aplicados en el preacondicionamiento de *Pinus engelmannii* Carr., condición ambiental-fertilización durante dos meses.

Tratamiento	Factores	
	Condición ambiental	Dosis de fertilización (N-P-K)
INV	Invernadero	Sin fertilización
INT	Intemperie	Sin fertilización
MS	Malla sombra al 50 %	Sin fertilización
MS + INT	Malla sombra al 50 % + Intemperie	Sin fertilización
INT + F	Intemperie	50 ppm (4-25-35 N-P-K) ^ϕ

INV = Invernadero; INT=Intemperie; MS = Malla Sombra; MS+INT = Malla Sombra más Intemperie (un mes en cada condición); INT+F = Intemperie + Fertilización; ^ϕ Fertilizante Peters Finalizador[®]

Para tener una referencia de la condición inicial del lote de plantas, previo a la aplicación de los tratamientos se realizó un muestreo destructivo en 20 plantas a las que se les midió altura, diámetro, biomasa aérea, radical y total. Así mismo, para determinar las concentraciones iniciales de N, P y K en el follaje, se formaron tres muestras compuestas de 120 acículas. Una vez seleccionadas al azar las plantas útiles para el experimento, se midió la altura y diámetro de 12 plantas en cada repetición (48 plantas por tratamiento) para tener una referencia inicial de altura y diámetro.

4.2.4. Evaluación morfológica

El 17 de julio, al final del preacondicionamiento, se realizó la evaluación morfológica de las plantas mediante un muestreo destructivo; para ello se seleccionaron en forma aleatoria 12 plantas por unidad experimental (48 por tratamiento) a las cuales se les midió el diámetro (a la base del cuello en mm), el volumen de la raíz (cm³) y la biomasa de la parte aérea y radical (g). Sin embargo, debido a que *P. engelmannii* Carr. tiene hábito de crecimiento cespitoso durante las etapas iniciales (no crece en altura), no se consideró medir la altura de las plantas en la evaluación morfológica. El volumen de la raíz se determinó con base en el principio de Arquímedes (Harrington *et al.*, 1994), usando una balanza de precisión y un vaso de precipitado con agua. Al sumergir las raíces en el agua, sin tocar las paredes del vaso, se registra un aumento de peso (g), que equivale al volumen de la raíz en cm³. Para evaluar la biomasa de las plantas, se separó la parte aérea de la raíz, la cual se lavó cuidadosamente para retirar el sustrato adherido. Una vez obtenidas las muestras se colocaron en bolsas papel por separado en una estufa a 70 °C, durante 72 h, hasta

obtener peso contante. Finalmente, se pesaron por separado en una balanza con precisión a 1 mg. Con las variables anteriores se determinó la relación parte aérea/raíz, así como el cociente entre el peso seco aéreo y el peso seco radical (Thompson, 1985).

4.2.5. Evaluación fisiológica

La evaluación fisiológica consistió en determinar el potencial de crecimiento de la raíz (PCR) con la metodología propuesta por Ritchie (1985). Se seleccionaron cinco plantas por unidad experimental (25 plantas por tratamiento), a las cuales se les midió el diámetro (en la base del cuello en mm) y se les retiró el sustrato adherido; además, se contó el número de raíces nuevas con la finalidad de conocer el estado inicial de la planta. Posteriormente, se colocaron en macetas de plástico de 7 L de capacidad. El sustrato estuvo compuesto por 70 % corteza de pino compostada, 10 % de turba, 10 % de agrolita, y 10 % de vermiculita. Las macetas con las plantas se colocaron en condiciones óptimas de temperatura, humedad y luminosidad para favorecer el crecimiento de nuevas raíces. Después de 28 días se realizó la evaluación del PCR, que consistió en retirar el sustrato de la raíz y contar en cada planta el número de raíces nuevas mayores a 1 cm (n) y la longitud de cada una (cm). Así mismo, se evaluó la biomasa de raíces nuevas (g).

4.2.6. Concentración de nutrimentos en el follaje

Para obtener la concentración de N, P y K en el follaje de las plantas se seleccionó una muestra compuesta por 120 acículas por cada unidad experimental y se registró su peso seco (g). Los análisis foliares se realizaron en el Laboratorio de Suelos y Tejidos Vegetales del Colegio de Postgraduados. Para la determinación de nitrógeno se utilizó el método micro-kjendahl, mientras que para las de fósforo y potasio se utilizó el proceso de digestión húmeda. Con los valores de peso seco de las muestras foliares (g), y la concentración (%) se calculó el contenido neto de nutrimentos para cada muestra.

4.2.7. Fase de plantación

El 19 de julio de 2013 se seleccionaron al azar cuatro plantas por unidad experimental (16 plantas por tratamiento) a las cuales se les midió el diámetro (mm) como medida inicial previo a la plantación. Las plantas se establecieron en una cama de crecimiento de 10 m de largo por 1.5 m de ancho y 0.8 m de altura. Se utilizó suelo agrícola con una profundidad del perfil de 60 cm

aproximadamente. Las plantas se distribuyeron en un diseño de bloques completos al azar, utilizando parcelas de cuatro plantas por tratamiento en cuatro bloques. A los 120 días después del trasplante se realizó la evaluación destructiva, para lo cual se extrajeron las plantas de la cama de crecimiento evitando en la medida de lo posible la pérdida de raíces. Una vez extraídas las plantas se lavaron y se determinó el diámetro a la base (mm), la longitud de la raíz más larga (cm), el número de raíces de primer orden, el volumen de raíz (cm³), la biomasa aérea, radical y total (g) después de secarlas en una estufa por 72 horas a 70 °C. Además, con los valores iniciales de diámetro se calculó el incremento en esta variable y la tasa relativa de crecimiento (Kramer y Kozlowsky, 1979), a través de la siguiente fórmula:

$$TRC = \frac{\ln(d_1) + \ln(d_2)}{t_2 - t_1}$$

Donde: TRC= tasa relativa de crecimiento en diámetro (mm mes⁻¹); d₁ y d₂ diámetro medido al inicio y al final del experimento; t₁= fecha de plantación; t₂= fecha de evaluación final. La diferencia entre fechas de evaluación fue de meses.

4.2.8. Diseño experimental y análisis estadístico

En el experimento de vivero se utilizó un diseño completamente al azar con cuatro repeticiones por tratamiento. El modelo estadístico usado fue:

$$Y_{ij} = \mu + C_j + E_{ij}.$$

Donde: Y_{ij} = Variable respuesta; μ = Media general; C_j = Efecto de la j-ésima condición ambiental y E_{ij} = Error aleatorio. En el caso de la plantación en las camas de crecimiento se utilizó un diseño en bloques completos al azar con el modelo:

$$Y_{ijkl} = \mu + B_i + C_j + E_{ijkl}.$$

Donde: Y_{ijkl} = Variable respuesta obtenida en la j-ésima planta ubicada en el i-ésimo bloque; μ = Media general; β = Efecto del i-ésimo bloque; C_j = Efecto de la j-ésimo tratamiento y E_{ijkl} = error aleatorio. Se realizaron análisis de varianza mediante el procedimiento GLM del paquete estadístico SAS 9.0 (SAS Institute, 2002). Cuando existieron diferencias significativas entre tratamientos se aplicaron pruebas de comparación de medias de Tukey (p ≤ 0.05). Previo a ello se validaron los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas mediante la prueba de Shapiro-Wilks y de Levene. Cuando no se cumplió alguno de estos se realizaron transformaciones mediante logaritmos naturales.

4.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.3.1. Atributos morfológicos

Las condiciones ambientales en la fase de acondicionamiento afectaron las características morfológicas de las plantas ($p \leq 0.05$) al final de la etapa de vivero (Cuadro 4.3). Los mejores resultados se obtuvieron cuando las plantas permanecieron en condiciones de intemperie con o sin fertilización. Los incrementos en diámetro y acumulación de biomasa en la parte aérea fueron de 18 y 6 %, respectivamente, en comparación con las plantas que se mantuvieron en invernadero. El efecto más drástico fue sobre la biomasa radical, con un 38 % de más acumulación con respecto a las plantas que crecieron en invernadero, seguida por la biomasa total con un 32 % y el volumen de raíz con 30 %. Las plantas expuestas al tratamiento de intemperie presentaron un mejor balance entre la parte aérea y la radical al presentar el valor menor (3.00), 24 % menos que el valor más alto (3.72), en las condiciones de invernadero. Lo anterior indica un equilibrio mejor entre la parte de transpiración y de absorción de agua y nutrientes, lo que es favorable cuando se planta en sitios con poca humedad (Romero *et al.*, 1986).

Cuadro 4.3. Valores promedio y significancia estadística para las variables diámetro, biomasa, volumen radical (VR) y relación parte aérea/parte radical (RPAR) de *Pinus engelmannii* Carr. a los nueve meses de edad.

Tratamiento	Diámetro (mm)	Biomasa (g)			VR (cm ³)	RPAR
		Aérea	Radical	Total		
INV	5.17 ± 0.17 b	3.60 ± 0.24 ab	1.00 ± 0.08 b	4.58 ± 0.32 ab	3.64 ± 0.28 c	3.72 ± 0.13 a
INT	6.09 ± 0.06 a	3.82 ± 0.06 a	1.32 ± 0.02 a	5.14 ± 0.05 a	4.75 ± 0.19 a	3.00 ± 0.10 b
MS	5.29 ± 0.06 b	2.99 ± 0.15 c	0.97 ± 0.04 b	3.94 ± 0.17 b	3.30 ± 0.14 c	3.15 ± 0.17 ab
MS + INT	5.59 ± 0.05 ab	3.10 ± 0.07 bc	0.96 ± 0.05 b	4.06 ± 0.11 b	3.74 ± 0.34 bc	3.40 ± 0.19 ab
INT + F	5.93 ± 0.18 a	3.63 ± 0.07 ab	1.19 ± 0.05ab	4.82 ± 0.05 a	4.68 ± 0.13 ab	3.18 ± 0.19 ab
(P > F)	0.0003	0.0022	0.0007	0.0008	0.0012	0.0500

INV=Invernadero; INT=Intemperie; MS=Malla Sombra; MS+INT= Malla Sombra más Intemperie (un mes en cada condición); INT+F=Intemperie + fertilización. Medias con letras iguales no son estadísticamente diferentes (Tukey, 0.05).

Las respuestas morfológicas de las plantas eran de esperarse, debido a que las plantas que crecieron en condiciones de intemperie redujeron el crecimiento en altura pero se incrementó el diámetro y la biomasa aérea; además, se promovió el crecimiento de la parte radical debido a que las condiciones de luz y temperatura propiciaron la pérdida de humedad en el sustrato, lo que genera niveles moderados de estrés en las plantas y modifica su morfología. Sin embargo, en la condición de invernadero las plantas acumularon una biomasa total similar a las que crecieron a la intemperie, lo que quizá se debió a niveles de temperatura y humedad relativa altos que propiciaron el crecimiento continuo de las plantas. Bajo estas condiciones, en los sustratos orgánicos como el utilizado en el estudio se promueve la actividad microbiana, liberando iones de nitrógeno los cuales se transforman en biomasa aérea (López y Estañol, 2007). El tratamiento de fertilización no modificó el crecimiento aéreo y radical de las plantas con respecto a las de intemperie sin fertilización, a pesar de que se encontró mayor concentración de todos los nutrimentos en las plantas fertilizadas. La falta de respuesta en crecimiento puede deberse a la tasa de crecimiento reducida de la especie o al efecto de otro factor limitativo. La disminución del crecimiento en algunas especies de coníferas se relaciona con baja disponibilidad de nutrientes; sin embargo, éstos pueden favorecer el crecimiento de la raíz (Landis y van Steenis, 2005; Navarro *et al.*, 2013).

Los resultados de este estudio concuerdan con Puértolas *et al.* (2009), quienes encontraron mejor calidad de planta en *Pinus halepensis* Mill. y *Quercus ilex* Lam., cuando se produjo bajo sombra moderada y a sol directo. Barnett (1989) encontró mejores incrementos en diámetro y biomasa subterránea en *Pinus palustris* Mill. y *P. taeda* L, cuando crecieron a sol directo que cuando utilizó malla sombra. Así mismo, Khan *et al.* (2000) encontraron que conforme disminuyen los niveles de sombra de 75 al 0 % (sol directo) aumenta la calidad morfológica de las plantas en cuatro especies de coníferas del noroeste de Estados Unidos.

4.3.2. Atributos fisiológicos

Las condiciones ambientales durante el precondicionamiento afectaron la concentración y el contenido de N, P y K en el follaje de las plantas ($p \leq 0.05$). Los niveles menores se encontraron en la intemperie. En cambio, los niveles mayores de N, P y K se obtuvieron cuando las plantas permanecieron en invernadero y en intemperie más fertilización con resultados similares. El contenido de nutrimentos siguió una tendencia similar al de las concentraciones (Cuadro 4.4).

Cuadro 4.4. Valores promedio y significancia estadística para el efecto de las condiciones ambientales en la concentración y contenido de N, P y K en el follaje de *Pinus engelmannii* Carr.

Tratamiento	Concentración (mg g ⁻¹)			Contenido (mg)		
	N	P	K	N	P	K
INV	12.5 ± 0.02 ab	2.2 ± 0.07 a	4.1 ± 0.25 a	4.69 ± 0.31 b	0.84 ± 0.04 a	1.54 ± 0.07 a
INT	10.3 ± 0.01 d	1.4 ± 0.15 c	2.6 ± 0.22 b	4.20 ± 0.10 b	0.60 ± 0.07 b	1.08 ± 0.10 b
MS	11.7 ± 0.01 bc	1.5 ± 0.20 bc	3.2 ± 0.46 ab	4.56 ± 0.51 b	0.58 ± 0.02 b	1.22 ± 0.05 b
MS + INT	11.0 ± 0.03 cd	1.7 ± 0.04 bc	2.9 ± 0.05 b	4.19 ± 0.21 b	0.63 ± 0.02 b	1.11 ± 0.04 b
INT + F	13.4 ± 0.02 a	2.0 ± 0.04 ab	3.7 ± 0.07 ab	6.17 ± 0.13 a	0.94 ± 0.02 a	1.70 ± 0.04 a
(P > F)	< 0.0001	0.0036	0.0143	0.0039	< 0.0001	0.0002

INV=Invernadero; INT= Intemperie; MS= Malla Sombra; MS+INT= Malla Sombra + Intemperie; INT+F= Intemperie + Fertilización. Medias con letras iguales no son estadísticamente diferentes (Tukey, 0.05).

Las plantas que crecieron a la intemperie con fertilización tuvieron una concentración de nitrógeno 30 % mayor que las de intemperie y sin fertilización. El fósforo mostró una concentración 57 y 43 % mayor en invernadero e intemperie más fertilización con respecto al de intemperie sin fertilización. Finalmente, la concentración de potasio fue mayor 58 y 42 % en los tratamientos de invernadero e intemperie más fertilización con relación al tratamiento de intemperie sin fertilizar. Las mayores concentraciones de N, P y K en las plantas que crecieron en la condición de intemperie más fertilización se debieron principalmente al suministro de estos nutrientes durante el preacondicionamiento. Sin embargo, las plantas que permanecieron en invernadero presentaron niveles de contenido similares a las plantas fertilizadas, lo cual puede deberse a que las altas temperaturas ambientales que se presentaron en el invernadero (Cuadro 4.1) afectaron la temperatura y la humedad del sustrato, lo que promovió el aumento en la liberación de nutrimentos en el fertilizante de liberación controlada aplicado al sustrato, el cual tiene una duración de nueve meses (Rose *et al.*, 2004). Así mismo, se propicia la descomposición de materia orgánica, lo que libera nutrientes que quedan disponibles para las plantas. A pesar de las variaciones en la concentraciones de N, P y K en el follaje, sólo el fósforo en las condiciones de intemperie más fertilización e invernadero y el potasio en el tratamiento de invernadero alcanzaron los niveles recomendados por Landis (1989) para especies de coníferas producidas en contenedor. Sin embargo, no existe información sobre los niveles óptimos de concentraciones de N, P y K en el

follaje para especies como *Pinus engelmannii* Carr. por lo que los niveles óptimos pueden variar. Cuando el precondicionamiento se realiza por nutrición, se disminuye la aplicación de nitrógeno para frenar el crecimiento en altura de la planta, pero se incrementan las dosis de fósforo y potasio para promover el crecimiento de raíz y la función osmótica en las hojas, respectivamente. Sin embargo, en el tratamiento de fertilización en el presente estudio, las mayores diferencias con respecto a la condición de invernadero e intemperie (sin fertilizante) se tuvieron en el contenido de N, y no en P o K. Por otro lado, la disminución de los riegos induce estrés hídrico, lo que promueve la acumulación de reservas, reduce la capacidad transpiracional y promueve la lignificación del tallo por lo tanto la planta incrementa su tolerancia ante estrés hídrico, térmico, nutricional y mecánico (Vilagrosa *et al.*, 2006).

4.3.3. Potencial de crecimiento radical

Las condiciones ambientales en la fase de precondicionamiento modificaron el potencial de crecimiento radical de las plantas, expresado en términos de número de raíces nuevas, longitud y biomasa de las mismas ($p \leq 0.05$). En general, los valores más altos de PCR se encontraron en las plantas que crecieron al menos un mes a la intemperie con o sin fertilización. En la condición de intemperie las plantas tuvieron 67 % más raíces, 53 % más longitud y 35 % más biomasa de raíces nuevas con respecto a aquellas en el tratamiento de invernadero (Cuadro 4.5).

Cuadro 4.5. Valores promedio y significancia estadística del potencial de crecimiento radical de *Pinus engelmannii* Carr., bajo el efecto de cuatro condiciones ambientales durante el precondicionamiento.

Tratamiento	Raíces nuevas ^φ (n)	Longitud (m)	Biomasa seca (g)
INV	43.80 ± 2.56 c	1.68 ± 0.12 c	0.17 ± 0.01 b
INT	73.20 ± 5.43 a	2.57 ± 0.22 a	0.22 ± 0.02 ab
MS	47.94 ± 3.03 bc	1.87 ± 0.10 bc	0.16 ± 0.01 b
MS + INT	60.85 ± 4.38 ab	2.21 ± 0.15 abc	0.19 ± 0.01ab
INT + F	67.00 ± 2.02 a	2.33 ± 0.09 ab	0.24 ± 0.02 a
(P > F)	0.0002	0.0046	0.0075

INV=Invernadero; INT=Intemperie; MS=Malla Sombra; MS+INT=Malla Sombra + Intemperie; INT+F=Intemperie + Fertilización.^φ Raíces mayores a 1 cm de longitud. Medias con letras iguales no son estadísticamente diferentes (Tukey, 0.05).

Las respuestas en PCR pueden atribuirse a diversos factores, principalmente a los niveles moderados de estrés hídrico al que estuvieron sometidas las plantas, ya que cuando permanecieron expuestas a condiciones de intemperie recibieron altos niveles de luminosidad y temperatura, en consecuencia se promovió la acumulación de carbohidratos en los tejidos de las plantas, los cuales se retraslocan a la raíz (Pallardy, 2008).

Coopman *et al.* (2008) encontraron resultados similares cuando preacondicionaron plantas de *Eucalyptus globulus* Labill. con niveles moderados de estrés hídrico. En cambio, Villar-Salvador (2004b) observó lo contrario cuando aplicó diferentes niveles de estrés en *Quercus ilex* Lam., ya que el valor mayor de biomasa de raíces nuevas ocurrió cuando la planta no sufrió estrés durante el preacondicionamiento.

En muchos casos el PCR se ha utilizado como predictor del desempeño de las plantas en campo cuando la absorción de agua depende del crecimiento de raíces nuevas (Simpson y Ritchie, 1996). Plantas con capacidad alta para generar raíces nuevas incrementan sus posibilidades de supervivencia en campo, tal es el caso del estudio de Oliet *et al.* (2003) quienes encontraron mayor supervivencia en *Pinus halepensis* Mill. cuando incrementó su capacidad para generar raíces nuevas. Del Campo *et al.* (2007) encontraron una fuerte relación entre el PCR y la supervivencia en la misma especie, en sitios de fertilidad alta y baja.

4.3.4. Evaluación de respuesta al transplante

Con relación al desarrollo de las plantas, después de 120 días de establecidas en las camas de crecimiento, no se encontraron diferencias significativas ($p \leq 0.05$), debido al efecto de los tratamientos aplicados en el preacondicionamiento, excepto en la tasa relativa de crecimiento en diámetro (Cuadro 4.6).

Cuadro 4.6. Valores promedio y significancia estadística para las variables diámetro final (DF), biomasa aérea (BA), radical (BR) y total (BT), volumen de raíz (VR), longitud raíz (LR), número de raíces primarias (NRP), tasa relativa de crecimiento en diámetro (TRCD) e incremento en diámetro (ID) en *Pinus engelmannii* Carr. después de 120 días de establecidas.

Tratamiento	DF (mm)	BA (g)	BR (g)	BT (g)	VR (cm ³)	LR (cm)	NRP (n)	TRCD (mm mes ⁻¹)	ID (mm)
INV	13.95	9.30	5.46	14.77	23.83	51.34	14.06	0.21 ab	8.00
INT	13.41	9.33	5.03	14.06	23.08	50.81	14.50	0.19 ab	7.01
MS	13.51	9.73	4.48	14.21	20.31	49.81	12.81	0.22 a	7.90
MS + INT	12.61	8.84	5.40	14.25	21.27	51.50	14.00	0.19 ab	6.70
INT + F	13.10	8.95	5.25	14.20	22.05	53.00	14.43	0.17 b	6.51
(P > F)	0.6995	0.9250	0.4097	0.9860	0.8990	0.4094	0.5031	0.0253	0.2331

INV=Invernadero; INT=Intemperie; MS=Malla Sombra; MS+INT=Malla Sombra + Intemperie; INT+F= Intemperie + Fertilización. Medias con letras iguales no son estadísticamente diferentes (Tukey, 0.05).

El hecho de que no existió efecto de los tratamientos en las variables evaluadas pudo atribuirse a que durante el desarrollo de la prueba no se presentaron condiciones climatológicas adversas, ya que durante los cuatro meses de evaluación las lluvias en el lugar fueron recurrentes; además, en esa época del año la precipitación es mayor que en los sitios de distribución natural de la especie. Así mismo, las temperaturas fueron favorables por lo que no existió sequía o presencia de heladas, las cuales exigen a la planta expresar sus mecanismos de resistencia al estrés. En esta especie la tasa de crecimiento es reducida y las plantas no salieron del estado cespitoso; esta es una característica inherente de algunas especies como *Pinus engelmannii* Carr. ya que se suprime el crecimiento en altura durante los primeros años (Nelson *et al.*, 2003). Aunque se esperaba un mayor efecto en las variables relacionadas al crecimiento de la raíz, la longitud total no se expresó de manera diferente probablemente debido a que las raíces de las plantas estuvieron confinadas a la profundidad del perfil de suelo de las camas de crecimiento; por ello, presentaron valores estadísticamente similares entre tratamientos.

4.4. CONCLUSIONES

Las condiciones ambientales aplicadas durante el preacondicionamiento en vivero influyeron en los atributos morfológicos y fisiológicos de calidad de planta en *Pinus engelmannii*. La mejor calidad se obtuvo cuando las plantas se expusieron a condiciones de intemperie durante dos meses antes de ser llevadas al sitio de plantación. El potencial de crecimiento de raíces nuevas se incrementó conforme los árboles se expusieron a condiciones de intemperie. La concentración de nutrimentos en el follaje de las plantas también estuvo influenciada por las condiciones ambientales y la fertilización.

Las condiciones ambientales no afectaron la respuesta al trasplante de *P. engelmannii* después del preacondicionamiento. Sin embargo, esta prueba podría reflejar mejores resultados si se realiza en un ciclo completo de crecimiento, dado que este estudio sólo se evaluó durante cuatro meses, lo que impidió a las plantas expresar sus mecanismos de resistencia al estrés generados en la fase de preacondicionamiento.

CAPÍTULO V

LITERATURA CITADA

- Alexander, R. R. and F. Ronco. 1987. Classification of the forest vegetation on the National Forests of Arizona and New Mexico. Research Note RM-469. USDA, Forest Service, Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station. Fort Collins, CO. USA. 10 p.
- Aranda, I., L. Castro, M. Pardos, L. Gil, and J. A. Pardos. 2005. Effects of the interaction between drought and shade on relations, gas exchange and morphological traits in cork oak (*Quercus suber* L.) seedlings. *Forest Ecology and Management* 210: 117-129.
- Barnett, J. P. 1989. Shading reduces growth of longleaf and loblolly pine seedlings in containers. *Tree Planters' Notes* 40: 23-26.
- Berguer, T. W. and G. Glatzel. 2001. Response of *Quercus petraea* seedlings to nitrogen fertilization. *Forest Ecology and Management* 149: 1-14.
- Boivin, R. J., B. D. Miller, and V. R. Timmer. 2002. Late season fertilization of *Picea mariana* seedlings under greenhouse culture: biomass and nutrition dynamics. *Annals of Forest Science* 59: 255-264.
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). 2010. Evaluación Externa de los Apoyos de Reforestación 2009. Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, México. 140 p.
- Coopman, R. R., J. C. Jara, L. A. Bravo, K. L. Sáenz, G. R. Mella, and R. Escobar. 2008. Changes in morpho-physiological attributes of *Eucalyptus globulus* plants in response to different drought hardening treatments. *Electronic Journal of Biotechnology* 11: 2-10.
- Corral R., J. J., J. G. Álvarez G., A. D. Ruiz G. and K. V. Gadow. 2004. Compatible height and site index models in El Salto, Durango, Mexico. *Forest Ecology and Management* 201: 146-160.
- Cortina, J., R. M. Navarro, y A. del Campo. 2006. Evaluación del éxito de la reintroducción de especies mediterráneas leñosas en ambientes mediterráneos. *In: J. Cortina, J. L. Peñuelas, J. Puértolas, R. Savé y A. Villagrosa (eds.). Calidad de planta forestal para la restauración de ambientes mediterráneos. Estado actual de conocimientos. Ministerio de medio ambiente, Madrid, España. pp: 11-30.*
- Cortina, J. A. Villagrosa and R. Trubat. 2013. The role of nutrients for improving seedling quality in drylands. *New Forests* 44: 719-732.
- Cuesta B., P. Villar-Salvador, J. Puértolas, D. F. Jacobs, and J. M. Rey-Benayas. 2010. Why do large, nitrogen rich seedlings better resist stressful transplanting conditions? *A*

physiological analysis in two functionally contrasting Mediterranean forest species. *Forest Ecology and Management* 260: 71-78.

- Davis, A. S., and D. F. Jacobs. 2005. Quantifying root system quality of nursery seedlings and relationship to outplanting performance. *New Forests* 30: 295-311.
- Del Campo, A. D., R. M. Navarro-Cerrillo, J. Hermoso, and A. J. Ibáñez. 2007. Relationship between root growth potential and field performance in Aleppo pine. *Annals of Forest Science* 64: 541-548.
- Dey, C. D., and W. L. Parker. 1997. Morphological indicators of stock quality and field performance of red oak (*Quercus rubra* L.) seedlings underplanted in a central Ontario shelterwood. *New Forests* 14: 145-156.
- Dickson, A., A. L. Leaf, and J. F. Hosner. 1960. Appraisal of white spruce and white pine seedling stock in nurseries. *The Forestry Chronicles* 36: 237-241.
- Dumroese, R. K. 2003. Hardening Fertilization and nutrient loading of conifer seedling. *In: L. E. Riley, K. R. Dumroese, and T. D. Landis. (tech. coords). National Proceedings: Forest and Conservation Nursery Associations, Ogden, UT. pp: 31-36*
- Duryea, M. L. 1985. Evaluating seedling: Importance to reforestation. *In: M. L. Duryea (ed.). Evaluating Seedling Quality: Principles, Procedures and Predictive Abilities of Mayor Test. Oregon State University, Corvallis. OR, USA. pp: 1-4.*
- Escobar, R. 2012. Fases de cultivo: Endurecimiento. *In: G. Buamscha, L. T. Contard, R. K. Dumroese, J. A. Enricci, R. Escobar, H. E. Gonda, D. F. Jacobs, T. D. Landis, T. Luna, J. G. Mexal, y K. M. Wilkinson. Producción de plantas en viveros forestales. Colección Nexos. Consejo Federal de Inversiones. Buenos Aires, Argentina. pp: 145-162.*
- FAO. 2010a. Evaluación de los recursos forestales mundiales 2010. Informe principal. Núm. 163. Roma, Italia. 346 p.
- FAO. 2010b. Evaluación de los recursos forestales mundiales 2010. Informe Nacional México. Roma, Italia. 98 p.
- García, E. 1981. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. 3a Ed. Instituto de Geografía. UNAM. México, D.F. pp: 252p.
- García A., A. y M. S. González E. 1998. Pináceas de Durango. 2a. Edición. Instituto de Ecología. Durango, Dgo. pp: 58-65.
- Gardiner, E. R., D. F. Jacobs., R. P. Overton, and G. Hernández. 2009. Root collar diameter and third-year survival of three bottomland planted of former agricultural fields in the Mississippi Alluvial Valley. *In: R. K. Dumroese, and L. E. Riley (tech. coords.) National*

- Proceedings: Forest and Conservation Nursery Associations-2008. RMRS-P-58. USDA, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. Fort Collins, CO, USA. pp: 85-99.
- Gazal, R. M., C. A. Blanche, and W. M. Carandang. 2004. Root growth potential and seedling morphological attributes of narra (*Pterocarpus indicus* Willd.) transplants. *Forest Ecology and Management* 195: 259-266.
- González E., M. S., M. González E., y M. A. Márquez L. 2007. Vegetación y ecorregiones de Durango. IPN-CIIDIR. Durango, Dgo. 219 p.
- Grossnickle, S. C. 2012. Why seedlings survive: influence of plant attributes. *New Forests* 43: 711-738.
- Haase, D. L. and R. Rose. 1993. Soil moisture stress induces transplant shock in stored and unstored 2 + 0 Douglas-Fir seedling of varying root volumes. *Forest Science* 39: 275-294.
- Haase, D. L. and R. Rose. 1995. Vector analysis and its use for interpreting plant nutrient shifts in response to silvicultural treatments. *Forest Science* 41: 56-60.
- Haase, D. L. 2007. Morphological and physiological evaluations of seedling quality. *In*: L. E. Riley, R. K. Dumroese, and T. D. Landis. (tech. coords). National proceedings: Forest and Conservation Nursery Associations-2006. Proc. RMRS-P-50. USDA, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. Fort Collins, CO. USA. pp: 3-8.
- Haase, D. L. 2008. Understanding forest seedling quality: measurements and interpretation. *Tree Planters' Notes* 52: 24-30.
- Harrington, J. T., J. G. Mexal, and J. Fisher. 1994. Volume displacement provides a quick and accurate way to quantify new root production. *Tree Planters' Notes* 45: 121-124.
- Hosmer, D. W., and S. Lemeshow. 2000. *Applied Logistic Regression*. Wiley & Sons Inc. New York. 392 p.
- INEGI. 2003. Conjunto de datos vectoriales de la carta edafológica escala 1:000 000. INEGI. Aguascalientes, Ags.
- Jackson, D. P., R. K. Dumroese, and J. P. Barnett. 2012. Nursery response of container *Pinus palustris* to nitrogen supply and subsequent effects on outplanting performance. *Forest Ecology and Management* 265: 1-12.
- Jacobs, D. F., and T. D. Landis. 2009. Hardening. *In*: R. K. Dumroese, T. Luna, and T. D. Landis. (eds.). *Nursery Manual for Native Plants: A Guide for Tribal Nurseries*. Volume 1: Nursery Management. Agric. Handbook 730. USDA, Forest Service. Washington, D.C. USA. pp: 217-227.

- Jacobs, D. F., T. D. Landis, and T. Luna. 2009. Propagation environments. *In*: R. K. Dumroese, T. Luna, and T. D. Landis. (eds.). Nursery Manual for Native Plants: A Guide for Tribal Nurseries. Volume 1: Nursery Management. Agric. Handbook 730. USDA, Forest Service. Washington, D.C. USA. pp: 55-75.
- Jobidon R., V. Roy, and C. Guillaume. 2003. Net effect of competing vegetation on selected environmental conditions and performance of four spruce seedlings stock sizes after eight years in Québec (Canada). *Annals of Forest Science* 60: 691-699.
- Johnson, J. D., and M. L. Cline, M. 1991. Seedling Quality of Southern Pines. *In*: M. L. Duryea, and P. M. Dougherty (eds.) Forest Regeneration Manual. Kluwer Academic Publisher. Netherlands. pp: 143-159.
- Jose S., S. Merritt, and C. L., Ramsey. 2003. Growth, nutrition, photosynthesis and transpiration responses of longleaf pine seedlings to light, water and nitrogen. *Forest Ecology and Management* 180: 335-344.
- Khan, S. R., R. Rose., D. L. Haase, and T. E. Sabin. 2000. Effects of shade on morphology, chlorophyll concentration, and chlorophyll fluorescence of four Pacific Northwest conifer species. *New Forests* 19: 171-186.
- Knapp, O. B., Wang G. G., J. L. Walker, and S. Cohen. 2006. Effects of site preparation treatments on early growth and survival of planted longleaf pine (*Pinus palustris* Mill.) seedling in North Carolina. *Forest Ecology and Management* 226: 122-128.
- Kramer, P. J., and T. T. Kozlowsky, 1979. *Physiology of Woody Plants*. Academic Press, New York. 811 p.
- Landis, T.D. 1985. Mineral nutrition as an index of seedling quality. *In*: M. L. Duryea, (ed.). *Proceedings: Evaluating Seedlings Quality: Principles, Procedures, and Predictive Abilities of Major Tests*. Oregon State University. Corvallis, OR. USA. pp: 29-48.
- Landis, T. D. 1989. Mineral Nutrients and Fertilization. *In*: T. D. Landis, R.W. Tinus, J. P. McDonald, and J. P. Barnett (eds.). *The Container Tree Nursery Manual*. Vol. 4 Seedling Nutrition and Irrigation. Agric. Handbook 674. USDA, Forest Service, Washington, DC. USA. pp: 1-67.
- Landis, T. D. 1992. Light. *In*: T. D. Landis, R W Tinus, S. E. McDonald, and J. P. Barnett (eds). *The Container Tree Nursery Manual*. Vol. 3, Atmospheric Environment. Agric. Handbook. 674. USDA, Forest Service. Washington, DC. USA pp: 73-121.
- Landis, T. D., R. W. Tinus, and J. P. Barnett. 1999. Seedling Development: The Establishment, Rapid Growth, and Hardening Phases. *In*: T. D. Landis, R. W. Tinus, and J. P. Barnett.

- The Container Tree Nursery Manual. Vol. 6. Seedling Propagation. Agric. Handbook. 674. USDA, Forest Service, Washington, DC. USA. pp: 123-167.
- Landis, T.D., and E. van Steenis. 2003. Macronutrients-Nitrogen: part 1. *In*: T. D. Landis, D. Steinfeld and R. Watson (eds.). Forest Nursery Notes. R6-CP-TP-04-03. USDA. Forest Service. Pacific Northwest Region, State and Private Forestry, Cooperative Programs. Portland, OR. USA. 5 p.
- Landis, T. D. 2005. Macronutrients-Potassium. *In*: R. K. Dumroese, T. D. Landis, D. Steinfeld, and R. Watson (eds.). Forest Nursery Notes. R6-CP-TP-11-04. USDA, Forest Service. Pacific Northwest Region, State and Private Forestry, Cooperative Programs. Portland, OR. USA pp: 5-11.
- Landis, T. D., and E. van Steenis. 2005. Macronutrients-Phosphorus. *In*: R. K. Dumroese, T. D. Landis, D. Steinfeld, and R. Watson (eds.). Forest Nursery Notes. R6-CP-TP-07-04. USDA, Forest Service. Pacific Northwest Region, State and Private Forestry, Cooperative Programs. Portland, OR. USA. pp: 6-14.
- Landis, T. D., R. K. Dumroese, and D. L. Hasse. 2010. The Target Plant Concept. *In*: T. D. Landis, R. K. Dumroese and D. L. Haase (eds). The Container Tree Nursery Manual. Vol. 7, Seedling Processing, Storage, and Outplanting. Agric. Handbook. 674. USDA. Forest Service. Washington, DC. USA. pp: 18-82.
- Landis, T. D. 2011. The target plant concept-a history and brief overview. *In*: L. E. Riley, D. L. Haase, and J. R. Pinto. (tech. coords). National Proceedings: Forest and Conservation Nursery Associations. Proc. RMRS-P-65. USDA. Forest Service, Rocky Mountain Research Station. Fort Collins, CO. USA. pp: 61-66
- Li, G. L., Y. Liu, Y. Zhu, J. Yang, H. Y. Sun, Z. K. Jia, and L. Y. Ma. 2011. Influence of initial age and size on the field performance of *Larix olguensis* seedlings. *New Forests* 42: 215-226.
- López L., M. A. y E. Estañol B. 2007. Detección de deficiencias de hierro en *Pinus leiophylla* a partir de los efectos de dilución y concentración nutrimental. *Terra Latinoamericana* 25:9-15.
- Lopushinsky, W. 1990. Seedling moisture status. *In*: R. Rose, S. J. Campbell, and T.D. Landis, (eds). Proceedings, Western Forest Nursery Association. General Technical Report RM-200. USDA, Forest Service, Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station. Fort Collins, CO. USA. pp: 123-138.
- Luis V. C., J. Puértolas, J. Climent, J. Peters, A. M. González-Rodríguez, D. Morales, and M. S. Jiménez. 2009. Nursery fertilization enhances survival and physiological status in Canary

Island pine (*Pinus canariensis*) seedlings planted in semiarid environment. *European Journal of Forest Research* 128: 221-229.

- Luis V. C., M. Llorca, E. Chirino, E. J. Hernández, and A. Vilagrosa. 2010. Differences in morphology, gas exchange and root hydraulic conductance before planting in *Pinus canariensis* seedlings growing under different fertilization and light regimes. *Trees* 24: 1143-1150.
- Marshall, J. D. 1985. Carbohydrate status as a measure of seedling quality. *In*: M. L. Duryea (ed.). *Proceedings: Evaluating Seedlings Quality: Principles, Procedures, and Predictive Abilities of Major Tests*. Oregon State University, Corvallis, OR. USA. pp: 59-71.
- Martínez, M. 1992. *Los pinos mexicanos*. 2da. ed. Botas. México, D.F. 361 p.
- Martínez S., M. y J. A. Prieto R. 2011. Determinación de áreas potenciales para el establecimiento de plantaciones comerciales forestales en la región norte de México. Folleto Técnico Núm. 47. Campo Experimental Valle del Guadiana. CIRNOC. INIFAP. Durango, Dgo. 36 p.
- Mattsson, A. 1996. Predicting field performance using seedling quality assessment. *New Forests* 13: 233-248.
- Medina G., G. G. Díaz P., J. López H., J. A. Ruiz C. y M. Marín S. 2005. Estadísticas Climatológicas Básicas del Estado de Durango. Libro Técnico Núm 1. Campo Experimental Valle del Guadiana. CIRNOC. INIFAP. Durango, Dgo. 234 p.
- Mejía B., J. M., J. A. Prieto R., X. García C., J. L. García H., J. Muñoz F., y S. Rosales M. 2011. Evaluación de plantaciones forestales en el estado de Durango. *In*: H. J. Muñoz F., J. A. Prieto R., A. Rueda S. y M. Alarcón B. *Evaluación de plantaciones forestales en la sierra madre occidental*. Libro Técnico Núm. 5. Campo Experimental Valle del Guadiana. CIRNOC. INIFAP. Durango, Dgo. pp: 57-86.
- Mexal, J.G., and T.D. Landis. 1990. Target seedling concepts: height and diameter. *In*: R. Rose, S. J. Campbell, and T. D. Landis (eds). *Proceedings, Western Forestry Nursery Association. General Technical Report RM-200*. USDA, Forest Service, Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station. Fort Collins, CO. USA. pp: 17-35.
- Mexal, J. G., R. A. Cuevas R., and T. D. Landis. 2008. Reforestation success in central Mexico: factors determining survival and early growth. *Tree Planters' Notes* 53: 16-22.
- Navarro, R. M., M. J. Retamosa, J. López, A. del Campo, C. Caeceros, and L. Salmoral. 2006. Nursery practices and field performance for the endangered Mediterranean species *Abies pinsapo* Boiss. *Ecological Engineering* 27: 93-99.

- Navarro, S., J. L., J. J. Vargas H., A. Gómez G. L del M. Ruíz P. y P. Sánchez G. 2013. Morfología, biomasa y contenido nutrimental en *Abies religiosa* con diferentes regímenes de fertilización en vivero. *Agrociencia* 47: 707-721.
- Nelson, C., D. C. Weng., T. Kubisiak., M. Stine., and C. L. Brown. 2003. On the number of genes controlling the grass stage in long leaf pine. *Journal of Heredity*: 94 392-398.
- Oliet, J., R. Planelles, F. Artero, E. Martínez M., L. Álvarez L., R. Alejano y M. López A. 2003. El potencial de crecimiento radical en planta de vivero de *Pinus halepensis* Mill. Influencia de la fertilización. *Investigación Agraria: Sistema de Recursos Forestales* 12: 51-60.
- Oliet, J., R. Planelles, F. Artero, R. Valverde, D. F. Jacobs, and M. L. Segura. 2009. Field performance of *Pinus halepensis* planted in Mediterranean arid conditions: relative influence of seedling morphology and mineral nutrition. *New Forests* 37:313-331.
- Pallardy, E. G. 2008. *Physiology of Woody plants* 3rd ed. Academic Press. San Diego, CA. 635 p.
- Pardos, M., M. D. Jiménez, I. Aranda, J. Puértolas, and J. A. Pardos. 2005. Water relations of cork oak (*Quercus suber* L.) seedling in response to shading and moderate drought. *Annals of Forest Science* 62: 377-384.
- Peñuelas R., J. L. y L. Ocaña B. 1996. *Cultivo de plantas forestales en contenedor, principios y fundamentos*. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Mundi-Prensa. Madrid, España. 190 p.
- Perry, J. 1991. *The pines of Mexico and Central America*. Timber Press, Portland, OR. USA. 221 p.
- Pinto, J. R. 2011. Morphology targets: what do seedling morphological attributes tell us? *In*: L. E. Riley, D. L. Haase, and J. R. Pinto. *National Proceedings: Forest and Conservation Nursery Associations*. Proc. RMS-P-65. USDA, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Fort Collins, CO. USA. pp: 71-79.
- Pinto, J. R., J D. Marshall, R. K. Dumroese, A. S. Davis, and D. R. Cobos. 2011. Establishment and growth of container seedlings for reforestation: A function of stocktype and edaphic conditions. *Forest Ecology and Management* 261: 1876-1884.
- Prieto R., J. A., E. H. Cornejo O., P. A. Domínguez C., J. J. Návar Ch, J G. Marmolejo M., y J. Jiménez P. 2004. Estrés hídrico en *Pinus engelmannii* Carr., producido en vivero. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales* 13: 443-451.
- Prieto R., J. A. y J. López U. 2006. *Colecta de conos y semillas del género Pinus*. Folleto Técnico Núm. 28. Campo Experimental Valle del Guadiana. CIRNOC. INIFAP. Durango, Dgo. 41 p.

- Prieto R., J. A., J. L. García R., J. A. Sigala R., J. M. Mejía B., A. Rueda S., y T. Sáenz R. 2011. Calidad de planta de los viveros forestales del estado de Durango. *In*: J. A. Prieto R., J. y T. Sáenz R. Indicadores de Calidad de Planta en Viveros Forestales de La Sierra Madre Occidental. Libro Técnico Núm. 3. Campo Experimental Valle del Guadiana. CIRNOC. INIFAP. Durango, Dgo. pp: 57-86.
- Prieto R., J. A., R. J. Almaraz R., J. J. Corral R., y A. Días V. 2012. Efecto del estrés hídrico en *Pinus cooperi* Blanco durante su preacondicionamiento en vivero. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 12: 20-28.
- Puértolas, J. L., L. Gil, and J. A. Pardos. 2003. Effects of nutritional status and seedling size on field performance of *Pinus halepensis* planted on former arable land in the Mediterranean basin. *Forestry* 73: 171-178.
- Puértolas, J. L. F. Benito, and J. L. Peñuelas. 2009. Effects of nursery shading on seedling quality and post-planting performance in two Mediterranean species with contrasting shade tolerance. *New Forests* 38: 295-308.
- Puttonen, P. 1996. Looking for the “silver bullet”- can one test do it all? *New Forests* 13: 9-27.
- Ramírez C., A. y D. A. Rodríguez T. 2004. Efecto de la calidad de planta, exposición y micrositio en una plantación de *Quercus rugosa*. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 10: 5-11.
- Ramírez C., Y. y D. A. Rodríguez T. 2010. Resistencia a bajas temperaturas en *Pinus hartwegii*, sometido a diferentes tratamientos con potasio. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 16:79-85.
- Rentería A., L. I., y A. García A. 1997. Las coníferas de la Reserva de la Biosfera “La Michilía”, Durango, México. *Madera y Bosques* 3: 53-70.
- Ritchie, G. A. 1985. Root growth potential: principles, procedures and predictive ability. *In*: M. L. Duryea (ed.). *Proceedings: Evaluating seedling quality: principles. Procedures, and Predictive Abilities of Mayor Tests.* Forest Research Laboratory, Oregon State University, Corvallis, OR. USA. pp: 93-104.
- Ritchie, G. A., T. D. Landis, K. Dumroese, and D. L. Hasse. 2010. Assessing Plant Quality. *In*: T. D. Landis, R. K. Dumroese, and D. L. Haase (eds.). *The Container Tree Nursery Manual. Vol. 7, Seedling Processing, Storage, and Outplanting.* Agric. Handbook. 674. USDA. Forest Service. Washington, DC. USA. pp: 2-15.
- Rodríguez T., D. A. y M. L. Duryea. 2003. Indicadores de calidad de planta en *Pinus palustris* Mill. *Agrociencia* 37: 299-307.

- Rodríguez T., D. A. 2006. Notas sobre el diseño de plantaciones de restauración. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 12: 111-123.
- Rodríguez T., D. A. 2008. Indicadores de calidad de planta forestal. Mundi-Prensa. México, D. F. 156 p.
- Rodríguez T., D. A., A. Martínez, C. Mendoza, B., F. García, C. Herrera, and R. De J. Amador. 2012. Micro sites and seedling quality in restoration. *Acta Botanica Gallica* 159: 299-30.
- Romero, A. E., J. Ryder J. T. Fisher, and J.G. Mexal. 1986. Root modification of container stock for arid land plantings. *Forest Ecology and Management* 16: 281-290.
- Rook, D. E. 1991. Seedling development physiology in relation to mineral nutrition. *In*: R. van den Driessche (ed.). *Mineral nutrition of conifer seedlings*. CRC Press, Boca Raton, FL. USA. pp: 85-101.
- Rose, R., W. C. Carlson, and P. Morgan. 1990. The target seedling concept. *In*: R. Rose, S. J. Campbell and T. D. Landis (eds.). *Proceedings, of the Target seedling symposium. Combined Meeting of the Western Forest Nursery Association. General Technical Report RM-200*. USDA, Forest Service, Fort Collins CO. USA. pp: 1-8.
- Rose, R., and D. L. Hasse. 1995. The target seedling concept. Implementing a program. *In*: T. D. Landis, and B. Cregg, (tech. cords.) *National Proceedings, Forest and Conservation Nursery Associations. General Technical Report PNW-GTR-365*. USDA. Forest Service, Pacific Northwest Research Station, Portland, OR. pp: 124-130.
- Rose, R., and J. S. Ketchum. 2003. Interaction of initial seedling diameter, fertilization and weed control on Douglas-fir growth over the first four years after planting. *Annals of Forest Science* 60: 625-635.
- Rose, R., D. L. Haase y E. Arellano. 2004. Fertilizantes de entrega controlada: potencial para mejorar la productividad de la reforestación. *Bosque* 25: 89-100.
- Royo, A., L. Gil, and J. A. Pardos. 2001. Effect of water stress conditioning on morphology, physiology and field performance of *Pinus halepensis* Mill. seedlings. *New Forests* 21: 127-140.
- SAS (Statistical Analysis System) Institute. 2002. *The SAS System for Windows. Release 9.00*. SAS Institute. Cary, N. C.
- Salisbury, F. B., and C. W. Ross. 1994. *Plant physiology*. 3rd ed. Wadsworth Publishing. Belmont, CA. USA. 540 p.
- Simpson, D. G. and G. A. Ritchie. 1996. Does the RPG predict field performance? A debate. *New Forests* 13: 249-273.

- Sit, V. 1995. Analyzing ANOVA Designs. Biometrics Information Handbook No. 5. Research Branch. British Columbia. Ministry of Forests. Victoria, B.C. Canada. 61 p.
- Sosa P., G. y D. A. Rodríguez T. 2003. Efecto de la calidad de planta en la supervivencia y crecimiento de *Pinus patula* en un área quemada. Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente 9: 34-43.
- South, D. B. 2000. Planting morphologically improved pine seedlings to increase survival and growth. Forestry and wildlife series No. 1. Alabama Agricultural Station, Auburn University, Auburn, AL. USA. 12 p.
- South, D. B., and R. G. Mitchell R. 2005. A Root-Bound Index for Container-Grown Pines. *In*: S. J. Colombo (comp.). The Thin Green Line: a symposium on the state-of-art in reforestation, proceedings. Forest Research Information Paper 160. Ontario Forest Research Institute. Ontario Ministry of Natural Resources, Sault Ste. Marie, Ontario, Canada. pp: 88-93.
- South, D., B. S. W. Harris, J. P. Barnett, M. J. Hains, and D. H. Gjerstad. 2005. Effect of container type and seedling size on survival and early height growth of *Pinus palustris* seedlings in Alabama, U.S.A. Forest Ecology and Management 204: 385-398.
- Thompson, B. E. 1985. Seedling morphological evaluation-What you can tell by looking? *In*: M. L. Duryea (ed.). Proceedings: Evaluating Seedlings Quality: Principles, Procedures, and Predictive Abilities of Major Tests. Oregon State University, Corvallis, OR. USA. pp: 59-71.
- Timmer, V. R. and E. L. Stone. 1978. Comparative foliar analysis of young balsam fir fertilized with nitrogen, phosphorus, potassium, and lime. Soil Science Society of America Proceedings 42: 125-130.
- Trubat, R., J. Cortina, and A. Vilagrosa. 2011. Nutrient deprivation improves field performance of woody seedlings in a degraded semi-arid shrubland. Ecological Engineering 37: 1164-1173.
- Tsakalimi, M., P. Ganatsas, and D. F. Jacobs. 2013. Prediction of planted seedling survival of five Mediterranean species based on initial seedling morphology. New Forests 44: 327-339.
- Valles G., A. G., J. C. Ríos S., J. A. López H., J. M. Ibarra F., J. J. Espinoza A., y C. L. Mar T. 2011. Caracterización del sector forestal en el estado de Durango. *In*: J. M. Ibarra F. A. Pajarito R., A. G. Valles G., J. J. Espinoza A. y C. L. Mar T. (eds.). Situación Agropecuaria y Forestal del Estado de Durango. Libro Técnico Núm 4. Campo Experimental Valle del Guadiana. INIFAP-CIRNOC. Durango, Dgo. pp: 139-182.

- van den Driessche, R. 1991. Effects of nutrients on stock performance in the forest. *In*: R. van den Driessche (ed.). Mineral nutrition of conifer seedlings. CRC Press, Boca Raton, FL. USA. pp: 85-101.
- Vilagrosa A., P. Villar-Salvador y J. Puértolas. 2006. El endurecimiento en vivero de especies forestales mediterráneas. *In*: J. Cortina, J. L. Peñuelas, J. Puértolas, R. Savé y A. Villagrosa. Calidad de planta forestal para la restauración de ambientes mediterráneos. Estado actual de conocimientos. Ministerio de medio ambiente, Madrid, España. pp: 11-30.
- Villar-Salvador., P. 2003. Importancia de la calidad de planta en los proyectos de revegetación. *In*: J. M. Rey-Benayas, T. Espigares P., y J. M. Nicolau I. (eds). Restauración de Ecosistemas Mediterráneos. Universidad de Alcalá. Asociación Española de Ecología Terrestre. pp: 66-80.
- Villar-Salvador, P., R. Planelles, E. Enríquez y J. Peñuelas R. 2004a. Nursery cultivation regimes, plant functional attributes, and field performance relationships in the Mediterranean oak *Quercus ilex* L. *Forest Ecology and Management* 196: 257-266.
- Villar-Salvador, P., R. Planelles, J. Oliet, J.L. Peñuelas-Rúbira, D. F. Jacobs, and M. González. 2004b. Drought tolerance and transplanting performance of olm oak (*Quercus ilex*) seedlings after drought hardening in the nursery. *Tree Physiology* 24: 1147-1155.
- Villar-Salvador, P., J. Puértolas, and J. L. Peñuelas. 2009. Assessing morphological and physiological plant quality for Mediterranean Woodland restoration projects: *In*: S. Bautista, J. Aronson, and R. Vallejo (eds.). Land Restoration to combat desertification: Innovate Approaches, Quality control and project evaluation. Fundación Centro de Estudios Ambientales del Mediterráneo (CEAM). pp: 103-120.
- Wightman, E. K. y C. B. Santiago C. 2003. La cadena de la reforestación y la importancia en la calidad de las plantas. *Foresta Veracruzana* 5: 45-51.
- Wilson, B. C. and D. F. Jacobs. 2006. Quality assessment of temperate zone deciduous hardwood seedlings. *New Forests* 31: 417-433.

ANEXO

Cuadro 1. Valores promedio de las variables morfológicas y concentración de nutrimentos en *Pinus engelmannii* Carr., después del preacondicionamiento, bajo cuatro condiciones ambientales en vivero.

Condición Ambiental	Altura (cm)	Diámetro (mm)	Biomasa (g)			Concentración (%)		
			Aérea	Radical	Total	N	P	K
INV	12.84 a	4.65 b	1.09 b	0.28 d	1.37 b	2.51 a	0.35 a	1.41 a
INT	10.58 b	5.03 a	1.22 ab	0.40 b	1.62 a	2.19 a	0.26 b	1.31 a
M S	11.22 b	4.51 b	1.38 a	0.34 c	1.72 a	2.39 a	0.28 b	1.44 a
MS + INT	11.06 b	4.86 b	1.35 a	0.42 a	1.81 a	2.44 a	0.29 b	1.44 a

INV=Invernadero; INT=Intemperie; MS=Malla Sombra; MS+INT= Malla Sombra más Intemperie (un mes en cada condición). Medias con letras iguales no son estadísticamente diferentes (Tukey, 0.05).

Cuadro 2. Valores promedio de las variables morfológicas y concentración de nutrimentos en el follaje de *Pinus engelmannii* Carr., después del preacondicionamiento, bajo tres niveles de fertilización condiciones ambientales en vivero.

Fertilización	Altura (cm)	Diámetro (mm)	Biomasa (g)			Concentración (%)		
			Aérea	Radical	Total	N	P	K
F0	10.91 b	4.74 ab	1.32 a	0.41 a	1.73 a	1.99 c	0.23 c	1.00 c
F1	11.49 ab	4.93 a	1.27 a	0.35 b	1.63 ab	2.36 b	0.29 b	1.28 b
F2	11.36 a	4.61 b	1.18 a	0.35 b	1.53 b	2.79 a	0.38 a	1.91 a

F0= Sin fertilización; F1=Dosis baja de fertilización; F2= Dosis baja de fertilización. Medias con letras iguales no son estadísticamente diferentes (Tukey, 0.05).

Cuadro 3. Valores promedio de las variables morfológicas y fisiológicas de *Pinus engelmannii* Carr., después del preacondicionamiento, bajo la interacción de cuatro condiciones ambientales y tres niveles de fertilización.

Interacción	Altura (cm)	Diámetro (mm)	Biomasa (g)			Concentración (%)		
			Aérea	Radical	Total	N	P	K
INV+F0	11.6 abc	4.51 ab	1.05 bc	0.28 d	1.33 cd	2.01 cde	0.23 de	0.76 d
INV+F1	13.1 ab	5.06 ab	1.23 abc	0.28 cd	1.52 bcd	2.50 abcde	0.39 ab	1.51 abc
INV+F2	13.8 a	4.39 ab	0.99 c	0.27 d	1.26 d	3.02 a	0.45 a	1.97 a
INT+F0	9.6 c	4.78 ab	1.21 abc	0.44 ab	1.65 bcd	1.75 e	0.17 e	0.83 d
INT+F1	10.5 c	5.21 a	1.18 abc	0.36 bcd	1.55 bcd	2.24 bcde	0.26 cde	1.17 cd
INT+F2	11.6 abc	5.10 ab	1.26 abc	0.40 bc	1.67 abcd	2.57 abcd	0.35 abc	1.93 a
MS+F0	11.3 bc	4.71 ab	1.44 ab	0.35 bcd	1.80 abc	2.15 bcde	0.21 de	1.07 cd
MS+F1	11.0 bc	4.53 ab	1.25 abc	0.35 bcd	1.61 bcd	2.28 abcde	0.29 bcd	1.38 bc
MS+F2	11.4 abc	4.28 b	1.44 ab	0.31 bcd	1.76 abc	2.73 abc	0.35 abc	1.87 ab
MSI+F0	11.2 bc	4.98 ab	1.59 a	0.56 a	2.15 a	1.91 de	0.22 de	1.05 cd
MSI+F1	11.3 bc	4.93 ab	1.42 ab	0.41 b	1.84 ab	2.56 abcd	0.29 bcd	1.37 bc
MSI+F2	10.6 c	4.67 ab	1.04 bc	0.41 bc	1.45 bcd	2.84 ab	0.36 abc	1.88 ab

INV=Invernadero; INT=Intemperie; MS=Malla Sombra; MSI= Malla Sombra más Intemperie (un mes en cada condición). F0=Sin fertilización; F1= Dosis baja de fertilización; F2=Dosis alta de fertilización. Medias con letras iguales no son estadísticamente diferentes (Tukey, 0.05).