



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCION DE ENSEÑANZA E INVESTIGACION EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO FORESTAL

Indicadores morfológicos y fisiológicos en *Abies religiosa* y su capacidad predictiva del desempeño en campo.

JOSÉ LUIS NAVARRO-SANDOVAL

T E S I S
PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MEXICO

2013

La presente tesis titulada: “INDICADORES MORFOLÓGICOS Y FISIOLÓGICOS EN *Abies religiosa* Y SU CAPACIDAD PREDICTIVA DEL DESEMPEÑO EN CAMPO.” realizada por el alumno: JOSÉ LUIS NAVARRO SANDOVAL bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS

FORESTAL

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO

Dr. J. Jesús Vargas Hernández

ASESOR

Dr. Armando Gómez Guerrero

ASESOR

Dra. Lucero Del Mar Ruíz Posadas

ASESOR

Dr. Prometeo Sánchez García

Montecillo, Texcoco, Estado de México, Septiembre de 2013

Indicadores morfológicos y fisiológicos en *Abies religiosa* y su capacidad predictiva del desempeño en campo.

José Luis Navarro-Sandoval, MC.

Colegio de Postgraduados, 2013.

RESUMEN GENERAL

El tamaño y las características morfológicas de la planta son factores importantes para lograr un buen desempeño en las plantaciones de restauración ecológica; las prácticas de cultivo en vivero que promueven el crecimiento radical y un adecuado nivel nutrimental para mejorar el desempeño de la planta en campo son indispensables en este proceso. Con el propósito de evaluar el efecto de la fertilización, el daño por heladas y la categoría diamétrica en el crecimiento, la morfología, la asignación de biomasa y el estado nutrimental en vivero, y su relación con la supervivencia y crecimiento de las plantas en dos ambientes de plantación (S_1 y S_2), se estableció un experimento con cuatro niveles de fertilización (T_{-50} , T_{Base} , T_{+50} y T_{+100}), dos condiciones del brote apical (sano y dañado) y las categorías D_1 y D_2 . Las plantas con menos fertilizante (T_{-50}) presentaron una altura 15 % menor y asignaron 36.2 % más biomasa a la raíz que en el testigo (T_{Base}); la concentración de nutrientes en raíz (N, P, y K), tallo (P) y hojas (N) fue 5.5 a 41.3 % mayor en las plantas con dosis altas (T_{+50} y T_{+100}). El daño por heladas produjo plantas con menor altura (5 %) pero mayor diámetro (13 %) y concentración nutrimental (entre 5.5 % para K en raíz y 28.9 % para N en tallo) que en las plantas no dañadas. La dosis de fertilización, el daño por heladas y categoría diamétrica modificaron la supervivencia de las plantas en la prueba de tolerancia a la deshidratación de la raíz; los tratamientos T_{-50} y T_{+100} presentaron la mayor tolerancia, que puede estar relacionada con el mayor equilibrio en la asignación de recursos en estas plantas; las plantas con daño por heladas en el brote terminal o con mayor diámetro del tallo (D_2) presentaron mayor tolerancia a la deshidratación de la raíz que las plantas no dañadas o de menor tamaño. Un año después de la plantación, la mortalidad de plantas en S_2 , sitio de mayor elevación, menor humedad del suelo y mayor fluctuación de temperatura, fue 84% mayor que en S_1 . Al parecer, cuando las condiciones ambientales son una limitante para el establecimiento de *Abies religiosa*, el estado nutrimental y un sistema radical abundante es un recurso útil para tolerar estas condiciones. El nivel de tolerancia a la deshidratación de las plantas con diferente dosis de fertilización se relacionó con la supervivencia de las plantas en S_2 pero no en S_1 . En los dos sitios las plantas con daño por heladas en el brote terminal presentaron mayor supervivencia que las plantas sin daño previo, aunque en S_1 las diferencias no fueron significativas. Las plantas D_1 tuvieron mayor supervivencia que las plantas D_2 en S_2 pero no en S_1 . Los resultados indican que la modificación del tamaño, asignación de biomasa y contenido nutrimental de las plantas tiene implicaciones importantes en el uso de la fertilización en vivero para asegurar un mejor desempeño de las plantas en campo; sin embargo el desempeño en campo de *Abies religiosa* estuvo afectado no solo por los tratamientos de fertilización, el estado del brote y el tamaño de las plantas; las condiciones del sitio de plantación fueron mucho más importantes y modificaron en gran medida el efecto de los otros factores, por lo que la selección de las plantas con las condiciones fisiológicas y morfológicas idóneas para cada ambiente de plantación debe ir acompañada de una selección cuidadosa de los sitios de plantación.

Palabras clave: fertilización, biomasa, morfología, tolerancia a la deshidratación, supervivencia, crecimiento

MORPHOLOGICAL AND PHYSIOLOGICAL INDICATORS *Abies religiosa* AND ITS PREDICTIVE CAPACITY OF FIELD PERFORMANCE

SUMMARY

Size and morphological traits of seedlings are important factors to achieve good performance in ecological restoration plantations; nursery practices that promote root growth and adequate nutrition to improve the performance of seedlings in the field are indispensable in this process. With the purpose of evaluating the effect of fertilization, frost damage and seedling size on seedling growth, morphology, biomass allocation and nutrition status in the nursery, and its relationship with seedling survival and growth in two planting environments (S_1 and S_2), an experiment with four levels of fertilization (T_{-50} , T_{Base} , T_{+50} and T_{+100}), two conditions of the apical bud (healthy and damaged) and diameter size (D_1 and D_2) was established. The seedlings with less fertilizer (T_{-50}) had a 15% lower height and assigned 36.2% more biomass to root than the control (T_{Base}); the concentration of nutrients in root (N, P, and K), stem (P) and leaves (N) was 5.5 to 41.3% higher in plants with high doses (T_{+50} and T_{+100}). Damage by frost produced plants with less height (5%) but larger diameter (13%) and nutrient concentration (between 5.5% for K in root and 28.9% for N in stem) than in undamaged plants. The dose of fertilization, damage from frost and diameter size modified survival of seedlings in the root dehydration tolerance test; the T_{-50} and T_{+100} treatments showed greater tolerance, which may be related to greater balance in resource allocation; seedlings with frost damage in the terminal shoot or with larger stem diameter (D_2) had higher tolerance to root dehydration than non-damaged or smaller seedlings. One year after planting, the mortality of plants in S_2 , the high-elevation site with lower soil moisture and greater temperature fluctuation, was 84% greater than in S_1 . Apparently, when environmental conditions are limiting, nutrient status and larger root system are useful for the establishment of *Abies religiosa*. The level of tolerance to root dehydration of seedlings with different fertilization doses was related to seedling survival in S_2 but not in S_1 . At both sites seedlings with frost damage in the terminal shoot showed better survival than plants without prior damage, but in S_1 the differences were not significant. Smaller seedlings (D_1) had better survival in S_2 as compared with D_2 seedlings, but not in S_1 . Results indicate that the modification of size, biomass allocation and nutrient content of seedlings has important implications in the use of fertilization in the nursery to ensure better performance of seedlings in the field. However the field performance of *Abies religiosa* seedlings was affected not only by fertilization treatments, shoot damage or seedling size; the planting site conditions were far more important and largely modified the effect of other factors, so the selection of seedlings with appropriate morphological and physiological conditions for each plantation environment must be accompanied by a careful selection of planting sites.

Key words: fertilization, biomass, seedling morphology, dehydration tolerance, survival, growth

AGRADECIMIENTOS

Al pueblo mexicano, que con la creación de instituciones como el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) logré obtener una beca y financiar mis estudios de postgrado y al Colegio de Postgraduados (COLPOS) institución dedicada a manejar y conservar los recursos naturales del país, por la oportunidad de continuar mi formación académica.

A los integrantes de mi consejo particular (de forma especial al Dr. Vargas) por aceptarme como su alumno y por ser los principales guías en la realización de mi trabajo de investigación, por todo el apoyo humano y material proporcionado para el desarrollo del presente trabajo, así como por todos sus acertados comentarios en la metodología y trabajos de evaluación en campo y por su revisión objetiva y crítica del trabajo de tesis; además de que cada uno de ellos son ejemplos a seguir para ser un excelente investigador, así como una extraordinaria persona.

Al Dr. Javier López Upton y al Dr. Héctor de los Santos Posadas por el apoyo ofrecido para las evaluaciones en campo y el análisis estadístico de los datos.

Al Ing. Salvador Castro Zavala, gerente del Vivero San Luis Tlaxialtemalco por facilitarme los recursos humanos y materiales necesarios en la realización de mi trabajo de investigación en vivero y por ser uno de mis guías en mi desarrollo profesional.

A mi personal de producción en la U-2 del Vivero San Luis (Ing. Nicolás Ramírez, M.C. Jorge Cruz, a las señoras Mayte, Tomasa, Elvia, Marisol, Rocío, Ángeles, los señores César y Rodolfo, al M.C. Miguel y al Ing. Ángel Trejo), quienes desinteresadamente me apoyaron en la producción de planta en vivero y su plantación en campo; no imagino la terminación de este trabajo de investigación sin su ayuda.

DEDICATORIA

Dicen que un hombre rinde el máximo de su capacidad cuando adquiere la plena conciencia de sus circunstancias; entendiendo como “circunstancias” todo aquello vivo o no, y que está en nuestro prójimo derredor y muy cerca de nosotros, o como lo dice ¹Ortega y Gasset (1914), “Yo soy yo y mi circunstancia, y si no la salvo a ella no me salvo yo”, es decir que, “lo que nosotros somos es en gran medida un producto de nuestro medio como de nuestro cuerpo, y si nosotros no salvamos a nuestro ambiente, también perdemos parte esencial de nosotros mismos” (²Ledig, 2004).

Sin embargo a mí me gusta más la interpretación espiritual y mística de nuestras culturas antiguas acerca de sus circunstancias y ³La Castañeda grupo mexicano de Rock en su canción Tloque-Nahuaque, lo interpretan de mejor manera. “Los que estamos hoy aquí, sobre ti que nos das de vivir, diosa triste madre impávida ¿hasta cuándo habrás de soportarnos? tú y sol padre nos crearon y hoy nos miran volvernors bastardos, no entendemos que nosotros no somos tus dueños que eres la conciencia viva e hija prodiga del universo, mi señora vieja sabia antes de que a tus hijos devores danos una flor de encanto que nos cure del mal del humano”.

A mi hijo José Emiliano quien hace mis circunstancias perfectas para vivir.

José Luis Navarro-Sandoval

¹Ortega y Gasset, J. 1914. *Meditaciones del Quijote*. Publicaciones Residencia de Estudiantes, series II, Vol. 1, Madrid. 207 p.

²Ledig, F. T. 2004. *Conservación y Manejo de Recursos Genéticos Forestales*. En: Vargas H., J. J., B. Bermejo V. y F. Thomas L. (Eds.). 2004. *Manejo de Recursos Genéticos Forestales, Segunda Edición*. Colegio de Postgraduados, Montecillo, Edo. de México, y Comisión Nacional Forestal, Zapopan, Jalisco. 209 p.

³La Castañeda. *Tloque-Nahuaque*. Globo negro (disco compacto). México. 1994

CONTENIDO

| | |
|---|-------------|
| RESUMEN GENERAL ----- | i |
| SUMMARY ----- | ii |
| AGRADECIMIENTOS ----- | iii |
| DEDICATORIA ----- | iv |
| LISTA DE CUADROS ----- | viii |
| LISTA DE FIGURAS ----- | x |
| INTRODUCCIÓN GENERAL ----- | 1 |
| Deforestación y restauración de ecosistemas forestales ----- | 1 |
| Morfología y fisiología de plantas para la restauración ----- | 3 |
| Estado nutrimental y su relación con el establecimiento de las plantas ----- | 5 |
| <i>Abies religiosa</i> ----- | 6 |
| CAPITULO 1. MORFOLOGÍA, BIOMASA Y CONTENIDO NUTRIMENTAL EN PLANTAS DE <i>Abies religiosa</i> CON DIFERENTES REGÍMENES DE FERTILIZACIÓN EN VIVERO ----- | 8 |
| RESUMEN ----- | 8 |
| SUMMARY ----- | 9 |
| INTRODUCCIÓN ----- | 10 |
| MATERIALES Y MÉTODOS ----- | 12 |
| Material biológico y condiciones del estudio ----- | 12 |

| | |
|---|-----------|
| Tratamientos de fertilización | 12 |
| Muestreo de plantas y características evaluadas | 13 |
| Análisis estadístico de los datos | 14 |
| RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 15 |
| Crecimiento de las plantas | 15 |
| Características morfológicas y distribución de biomasa | 19 |
| Concentración y contenido de nutrientes | 21 |
| CONCLUSIONES | 26 |
| CAPITULO 2. EFECTO DE LA FERTILIZACIÓN Y DAÑO POR HELADAS EN VIVERO SOBRE LA SUPERVIVENCIA Y CRECIMIENTO EN CAMPO DE PLANTAS DE <i>Abies religiosa</i> | 27 |
| RESUMEN | 27 |
| SUMMARY | 28 |
| INTRODUCCIÓN | 29 |
| MATERIALES Y MÉTODOS | 31 |
| Material biológico y condiciones del estudio | 31 |
| Características evaluadas al final de la etapa de vivero | 32 |
| Establecimiento de las plantas en campo | 33 |
| Características evaluadas en campo | 34 |
| Análisis estadístico de los datos | 35 |
| RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 37 |

| | |
|---|-----------|
| Crecimiento potencial de raíz ----- | 37 |
| Tolerancia a la deshidratación de la raíz ----- | 41 |
| Supervivencia de las plantas en los sitios de plantación ----- | 45 |
| Crecimiento y fenología de las plantas en los sitios de plantación ----- | 54 |
| CONCLUSIONES ----- | 59 |
| CAPITULO 3. CONCLUSIONES GENERALES ----- | 60 |
| LITERATURA CITADA ----- | 61 |

LISTA DE CUADROS

| | |
|---|----|
| Cuadro 1.1. Dosis de N, P y K (ppm) por aplicación en el tratamiento testigo (T_{Base}) durante el ciclo de producción de <i>Abies religiosa</i> en el vivero.----- | 13 |
| Cuadro 1.2. Significancia estadística (p) del efecto de la fertilización y daño al brote terminal en el crecimiento en altura y diámetro de plantas de <i>Abies religiosa</i> durante el periodo de producción en vivero (TRC= tasa relativa de crecimiento).----- | 16 |
| Cuadro 1.3. Significancia estadística (p) del efecto de la fertilización y daño del brote en las características morfológicas de las plantas de <i>Abies religiosa</i> al final del ciclo de producción en vivero.----- | 19 |
| Cuadro 1.4 Valores promedio por tratamiento de fertilización de las características morfológicas y biomasa de las plantas de <i>Abies religiosa</i> al final del ciclo de producción en vivero.----- | 20 |
| Cuadro 1.5. Significancia estadística (p) del efecto de la fertilización y del daño al brote terminal en la concentración de Nitrógeno (N), Fósforo (P) y Potasio (K) en raíz, tallo y hojas y en su contenido total en plantas de <i>Abies religiosa</i> . ----- | 22 |
| Cuadro 1.6. Valores promedio de concentración de Nitrógeno (N), Fósforo (P) y Potasio (K) en raíz, tallo y hojas y su contenido total, por tratamiento de fertilización en plantas de <i>Abies religiosa</i> .----- | 23 |
| Cuadro 1.7. Valores promedio de concentración de Nitrógeno (N), Fósforo (P) y Potasio (K) en raíz, tallo y hojas, por condición del brote en plantas de <i>Abies religiosa</i> . ----- | 25 |

Cuadro 2.1. Significancia estadística (p) del efecto de la fertilización, daño por heladas y categoría diamétrica en la biomasa de raíces (nuevas, viejas y totales) de plantas de *Abies religiosa* en la prueba de crecimiento potencial de raíz-----**37**

Cuadro 2.2. Valores promedio por tratamiento de fertilización, daño del brote y categoría diamétrica de la biomasa seca de raíces en *Abies religiosa* en la prueba de crecimiento potencial de raíz.-----**39**

Cuadro 2.3. Significancia (p) de los parámetros estimados en el modelo Log-Log ajustado a la curva de supervivencia de plantas de *Abies religiosa* en la prueba de tolerancia a la deshidratación de la raíz. -----**42**

Cuadro 2.4. Significancia (p) de los parámetros estimados para cada sitio (S_1 y S_2) en el modelo Log-Log ajustado a la curva de supervivencia de plantas de *Abies religiosa*. -----**48**

Cuadro 2.5. Significancia estadística (p) del efecto del sitio y tratamientos (fertilización, estado del brote y categoría diamétrica) sobre el crecimiento de las plantas y fenología de la yema terminal en *Abies religiosa* después de su plantación en campo. -----**54**

Cuadro 2.6. Efecto del sitio, dosis de fertilización, daño por heladas y categoría diamétrica en el crecimiento de las plantas y fenología de la yema terminal en *Abies religiosa* después de su plantación en campo. -----**56**

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.1.** Efecto de la dosis de fertilización en el crecimiento promedio y TRC en altura (a, c) y diámetro (b, d) de plantas de *Abies religiosa* en vivero. En las Figuras c y d, barras con letra distinta son diferentes ($p \leq 0.05$). ----- 17
- Figura 1.2.** Efecto del daño por helada en el brote sobre el crecimiento en altura (a) y diámetro (b) de plantas de *Abies religiosa* en vivero. ----- 18
- Figura 1.3.** Distribución de frecuencias diamétricas en plantas de *Abies religiosa* a los 10 meses de edad en vivero. ----- 19
- Figura 2.1.** Crecimiento de la raíz en plantas de *Abies religiosa* de los tratamientos T-50 (a), TBase (b) y T+50 (c) al finalizar el periodo de evaluación de la prueba de crecimiento potencial de raíz.----- 38
- Figura 2.2.** Efecto del tratamiento de (a) fertilización, (b) daño por heladas y (c) tamaño de la planta en la dinámica de la curva de supervivencia de plantas de *Abies religiosa* después de exponer la raíz a una deshidratación.----- 43
- Figura 2.3.** Efecto del sitio de plantación en la dinámica de la curva de supervivencia de plantas de *Abies religiosa*. ----- 46
- Figura 2.4.** Valores promedio del contenido de: (a) humedad en el suelo y humedad relativa mínima diaria, y (b) temperatura mínima y máxima diaria a lo largo del periodo de estudio en los dos sitios de plantación (S_1 y S_2). Los datos de humedad relativa y temperatura representan el promedio diario del periodo previo a la fecha de medición. ---- 47
- Figura 2.5.** Efecto del tratamiento de fertilización (a, b), el estado del brote terminal (c, d) y la categoría diamétrica en tallo (e, f) sobre la curva de supervivencia de las plantas de *Abies religiosa* en los sitios S_1 (a, c y e) y S_2 (b, d y f) ----- 50

INTRODUCCIÓN GENERAL

Deforestación y restauración de ecosistemas forestales

En la actualidad las actividades antropogénicas son la principal causa de perturbación de los ecosistemas forestales (Keyes, 1996; Vitousek *et al.*, 1997; Endara *et al.*, 2012), donde la destrucción, fragmentación y degradación de los hábitats son las principales formas de alteración (Saunders *et al.*, 1991), provocadas por la sobreexplotación, contaminación, incendios y plagas; lo que afecta la biodiversidad y la disponibilidad y calidad de los bienes y servicios que proveen. (Naeem *et al.*, 1994; Kozlowski, 2002; Zipperer *et al.*, 2012). Por ello, es de gran importancia no sólo para conservar sino también para restaurar (Roberts *et al.*, 2009; Lambin y Meyfroidt, 2011) poner en práctica la restauración de ecosistemas forestales (Ciccarese *et al.*, 2012). El establecimiento de las plántulas y su crecimiento posterior en el sitio de reforestación son de suma importancia para el éxito de la regeneración del bosque. A medida que la sociedad pone más presión a las áreas forestales, se incrementa la necesidad preservar más los remanentes de bosques primarios y los bosques de carácter ecológicamente sensibles (Grossnickle, 2000).

La restauración de ecosistemas es un proceso complejo y hay muchos factores que van a hacer a un programa un caso exitoso; entre ellos se incluye la selección de la fuente genética adaptada a las condiciones del sitio (Zobel y Talbert, 1984), las prácticas silvícolas relacionadas con el proceso, como la preparación y ambiente del sitio, la fecha y el método de plantación, la selección de especies y el manejo (Lavender *et al.*, 1990; Duryea y Dougherty, 1991; Hobbs *et al.*, 1992; Grossnickle, 2000; Ciccarese *et al.*, 2012). Por ello la supervivencia inicial en estas plantaciones es decisiva en el proceso de restauración, al

modificar la dinámica poblacional y los atributos estructurales del ecosistema (Margolis y Brand, 1990).

La supervivencia es de vital importancia en especies clave del ecosistema, o en aquellas que están aisladas o que se encuentran en áreas degradadas y que están sujetas a disturbios biológicos, climáticos y antropogénicos recurrentes (Gray y Spies, 1996; Alvarado-Rosales y Hernández-Tejeda, 2002; Ángeles-Cervantes y López-Mata, 2009; Ciccarese *et al.*, 2012), ya que su recuperación a menudo es lenta, impredecible y llena de dificultades (Kozłowski, 2002; Endara *et al.*, 2012). Por ello se necesitan métodos asistidos como el establecimiento de plantaciones (Smith, 1995; Keyes, 1996), y estrategias que integren acciones para fomentar la biodiversidad y los bienes y servicios ecosistémicos (Aerts y Honnay, 2011; Ciccarese *et al.*, 2012)

El establecimiento y supervivencia en campo puede ser mejorado a través de prácticas de cultivo en vivero, que aseguren calidad de planta y que promuevan el desarrollo y crecimiento del sistema radicular y un adecuado nivel nutrimental (Rook, 1991; Tsakalidimi *et al.*, 2009), un rápido crecimiento radical mejora la absorción de agua y el transporte de nutrientes, lo que fomenta la supervivencia y crecimiento (Chirino *et al.*, 2008), ya que las plantas son vulnerables en sitios que presentan periodos de sequía y bajas temperaturas (heladas), siendo estas las principales causas ambientales que afectan es establecimiento inicial de los bosques en México (CONAFOR, 2010) junto con una mala calidad de planta.

En un proyecto de restauración forestal, hay factores estratégicos a considerar, pero el factor clave para el éxito es utilizar planta de calidad de acuerdo a las necesidades del sitio, es decir, con características morfológicas y fisiológicas óptimas (Mattsson, 1996; Grossnickle, 2005; Ciccarese *et al.*, 2012). Es por ello que las plantas producidas en vivero

pueden ser un medio eficaz de asegurar el establecimiento y rápido crecimiento (Scagel *et al.*, 1998).

Al considerar la calidad de planta y el ambiente del sitio de plantación de forma conjunta se generó el concepto de planta objetivo (Ritchie *et al.*, 2010), que proporciona un medio para superar las variables críticas del establecimiento, centrándose en las características morfológicas y fisiológicas que están relacionadas con desempeño en campo (Rose *et al.*, 1990; Landis y Dumroese, 2006). La importancia de la planta objetivo es identificar las características de la planta para aumentar el desempeño en campo bajo un conjunto particular de condiciones del sitio (Rose *et al.*, 1990, Ritchie *et al.*, 2010).

Morfología y fisiología de plantas para la restauración

Los proyectos de reforestación a partir de plantas producidas vivero pueden ser un medio eficaz para asegurar el éxito en el establecimiento y crecimiento en campo; sin embargo, el éxito depende de una adecuada selección de la morfología y fisiología de las plantas y del ambiente del sitio (Scagel *et al.*, 1998). En la actualidad existen muchos indicadores para evaluar la calidad de la planta y muchos de ellos se correlacionan de forma positiva con el desempeño en campo (Dey y Parker, 1997; Rose *et al.*, 1997); algunos de ellos se basan en características morfológicas relativamente fáciles de medir (Thompson, 1985; Pinto *et al.*, 2011), siendo el diámetro y la altura los más utilizados. El manejo en vivero tiene como objetivo cultivar plantas con atributos que le permitan una mejor oportunidad de éxito una vez plantada campo, ya que las prácticas culturales de vivero tienen una fuerte influencia en el desempeño (Grossnickle, 2012). A pesar de los estudios realizados, todavía existe la necesidad de desarrollar indicadores morfológicos y fisiológicos de acuerdo a los sitios de plantación (Oliet *et al.*, 2009a.), con un énfasis

principal en mejorar la supervivencia y un énfasis secundario en el crecimiento, especialmente en condiciones ambientales adversas, como la sequía (Duryea, 1984; Rose *et al.*, 1990; Mattsson, 1996; Villar-Salvador *et al.*, 2004b; Wilson y Jacobs, 2006; Cuesta *et al.*, 2010) y las bajas temperaturas. Debido a la inversión económica en los programas de reforestación es que se comenzó a examinar las fallas en la plantación y se trataron de encontrar las razones de la poca supervivencia, lo que se asoció con el estrés de plantación, competencia, suelos pobres y condiciones ambientales adversas (Ward *et al.*, 2000; Wilson y Jacobs, 2006; Jacobs *et al.*, 2012); sin embargo, en muchos casos la causa del fracaso de la plantación se atribuyó a la calidad de planta (CONAFOR, 2010) o la condición crítica de las plantas para no generar raíces nuevas (Davis y Jacobs, 2005).

Las plantas deben ser producidas fisiológicamente listas para la plantación en campo (Lavender y Cleary, 1974), ya que de ello depende la respuesta a las condiciones de estrés ambiental (Miller, 1983); plantas no preparadas fisiológicamente (Tinus, 1974; Hobbs, 1984) o que carecen de un adecuado equilibrio nutrimental no son capaces de establecerse rápidamente. Por ello, el endurecimiento o aclimatación basado en un estrés lentamente creciente para inducir ajustes fisiológicos (Kozlowski y Pallardy, 2002) es importante para desarrollar la protección contra condiciones del sitio potencialmente estresantes. Es común aplicar tratamientos de aclimatación mediante prácticas culturales en vivero (Wakeley, 1954; Lavender y Cleary, 1974; Landis *et al.*, 1999) para aumentar las probabilidades de supervivencia a las condiciones del sitio, ejemplos de ello son la reducción de la temperatura, el riego y la fertilización (Tinus y McDonald, 1979; Landis *et al.*, 1999).

La morfología también juega un papel muy importante en el establecimiento de una planta; por ejemplo, una mayor área foliar permite una mayor capacidad fotosintética, lo

que puede facilitar un rápido crecimiento y capacidad para competir por los recursos del sitio (Grossnickle, 2000; Oliet *et al.*, 2009b), por lo que valores altos en diámetro y altura podrían promover un mejor desempeño. Sin embargo, el establecimiento requiere también un equilibrio entre la evapotranspiración del área fotosintética y la capacidad de las raíces para absorber de agua; por ello, plantas con una parte aérea desproporcionada con la parte radical pueden tener desventajas en circunstancias ambientales desfavorables, como lugares con mucho viento, con altas temperaturas o con poca humedad en el suelo (Lamhamedi *et al.*, 1997; South *et al.*, 2001). Por lo anterior, la relación parte aérea/ raíz es considerada como un índice importante de calidad morfológica (Thompson, 1985), especialmente en las zonas secas (Birchler *et al.*, 1998); la morfología y fisiología de la raíz (la biomasa radical, tolerancia a la deshidratación) también puede ser un indicador eficaz en la predicción del desempeño de las plantas (Ritchie y Dunlap, 1980; Rose *et al.*, 1997; Davis y Jacobs, 2005), ya que las plantas con mejor desarrollo del sistema radical son mejores para superar estas condiciones adversas, (Tsakaldimi *et al.*, 2013).

Estado nutrimental y su relación con el establecimiento de las plantas

La fertilización de las plantas cultivadas en vivero juega un papel importante en la respuesta a la plantación (Rook, 1991), al promover una carga nutrimental y construir reservas nutrimentales durante el cultivo, lo que se ha relacionado con un mejor desempeño (Timmer, 1996; Oliet *et al.*, 2009a); plantas con adecuados niveles nutrimentales usualmente exhiben una mejor supervivencia, crecimiento y capacidad competitiva (Oliet *et al.*, 2011), siendo la retranslocación de nutrientes el mecanismo clave para explicar el mejor desempeño (Salifu *et al.*, 2008). Este efecto es de especial importancia en suelos poco

fértiles y con condiciones climáticas adversas o para el establecimiento en diversos hábitats (Folk y Grossnickle, 2000; Salifu y Timmer, 2003; Salifu *et al.*, 2009).

El desempeño en campo se ha relacionado con el estatus nutrimental; sin embargo, la mayoría hace un énfasis en la concentración o contenido de N (Van Den Driessche, 1980; Imo y Timmer, 1999). Por ejemplo, altas concentraciones foliares de N se relacionan con una mejor asimilación fotosintética después de la plantación, lo que mejora el crecimiento en muchas especies (Van Den Driessche, 1987; Green y Mitchell, 1992). Además, N es el nutriente con la mayor capacidad para modificar los parámetros morfológicos en el cultivo en vivero (Rook, 1991; Villar-Salvador *et al.*, 2005). Sin embargo, resultados recientes muestran que P y K también influyen en la supervivencia y crecimiento de las plántulas, principalmente en zonas con deficiencias de humedad y altas temperaturas (Villar-Salvador *et al.*, 2004a; Oliet *et al.*, 2005), P a través de la promoción del crecimiento radicular (Folk y Grossnickle, 2000) y K con un mejor ajuste osmótico y conductancia estomática, mejorando el estado hídrico de la planta (Davies y Zhang, 1991; Kearws y Assmann, 1993), pero también hay estudios que reportan efectos negativos de altas concentraciones de nutrientes en la supervivencia (Trubat *et al.*, 2008).

Abies religiosa

Los estudios de supervivencia y crecimiento después de la plantación son relativamente escasos y más en especies con poblaciones altamente perturbadas como *Abies religiosa*, que es una especie nativa de México y que presenta problemas de regeneración y una elevada mortalidad de su arbolado (Alvarado-Rosales y Hernández-Tejeda, 2002). La mayoría de los estudios se han centrado en correlacionar la morfología inicial de las plantas con el crecimiento posterior en campo; sin embargo, muy pocos toman en cuenta las

características fisiológicas para predecir la supervivencia y el crecimiento. Por otra parte, la mayoría de estos estudios se han realizado en condiciones mésicas (adecuada humedad) y con especies de alto valor comercial, mientras que los datos para predecir el desempeño para especies de importancia ecológica o para aquellas utilizadas en la reforestación de sitios degradados o perturbados son muy escasos.

La determinación de la morfología y fisiología (estado nutrimental) de las plantas en la etapa final del vivero y los posibles efectos sobre el desempeño después de la plantación pueden mejorar nuestra comprensión para la manipulación de los regímenes de fertilización en la etapa de vivero y mejorar el éxito de las plantaciones de restauración de poblaciones de *Abies religiosa*.

Un mejor conocimiento del papel que juegan la morfología y el estado nutrimental después de la plantación es importante, debido a que el régimen de fertilización afecta a los dos factores en vivero. Esto puede contribuir a una mejor comprensión de la importancia de cada efecto en las respuestas a la plantación, especialmente bajo condiciones ecológicas y climáticas en donde se desarrolla la especie. El presente estudio tiene como objetivo determinar la influencia de la morfología y estado nutrimental de las plantas en vivero en la supervivencia, crecimiento y fenología de la yema terminal en plantas de *Abies religiosa* en dos ambientes de plantación; además, se explora el posible efecto del daño por heladas en vivero sobre el desempeño posterior de las plantas en campo.

CAPITULO 1. MORFOLOGÍA, BIOMASA Y CONTENIDO NUTRIMENTAL EN PLANTAS DE *Abies religiosa* CON DIFERENTES REGÍMENES DE FERTILIZACIÓN EN VIVERO

RESUMEN

El tamaño y las características morfológicas de la planta son factores importantes para lograr un buen desempeño en las plantaciones de restauración ecológica. Con el propósito de evaluar el efecto de la fertilización y del daño por heladas en el crecimiento, la morfología, la asignación de biomasa y el estado nutrimental en plantas de *Abies religiosa*, se estableció un experimento en vivero con cuatro niveles de fertilización (T_{-50} , T_{Base} , T_{+50} y T_{+100}) y dos condiciones del brote apical (sano y dañado) en un diseño completamente al azar. Durante los siete meses posteriores al inicio de los tratamientos se midió la altura y el diámetro del tallo en una muestra aleatoria de plantas por tratamiento y al final del ciclo de producción se determinó la biomasa y el contenido nutrimental de los componentes de la planta. Se encontró un efecto significativo ($p \leq 0.05$) de los dos factores en el tamaño, la tasa relativa de crecimiento, la asignación de biomasa y la concentración de nutrimentos en las plantas, pero sin interacción entre ellos. Las plantas con menos fertilizante (T_{-50}) presentaron una altura 15 % menor y asignaron 36.2 % más biomasa a la raíz que en T_{Base} ; la concentración de nutrientes en raíz (N, P, y K), tallo (P) y hojas (N) fue 5.5 a 41.3 % mayor en las plantas con dosis altas (T_{+50} y T_{+100}). El daño por heladas produjo plantas con menor altura (5 %) pero mayor diámetro (13 %) y concentración nutrimental (entre 5.5 % para K en raíz y 28.9 % para N en tallo) que en las plantas no dañadas. La modificación del tamaño, asignación de biomasa y contenido nutrimental de las plantas tiene implicaciones importantes en el uso de la fertilización en vivero para asegurar un mejor desempeño de las plantas en campo.

Palabras clave: distribución de biomasa, morfología de la planta, daños por heladas, nutrición de la planta, producción de planta.

SUMMARY

The size and morphological traits of seedlings are important factors to achieve good performance in the ecological restoration plantations. With the purpose of evaluating the effect of fertilization and frost damage on seedling growth, morphology, biomass allocation and the nutritional status in *Abies religiosa*, an experiment was established in the nursery with four levels of fertilization (T_{-50} , T_{Base} , T_{+50} and T_{+100}) and two conditions of the apical bud (healthy and damaged) in a completely randomized design. During seven months after starting the treatment, stem height and diameter were measured in a random sample of seedlings per treatment, and seedling biomass and nutrient content were determined at the end of the nursery production cycle. A significant effect ($p \leq 0.05$) of both factors on seedling size, relative growth rate, biomass allocation and nutrient concentration was found, but without interaction between them. Seedlings with less fertilizer (T_{-50}) presented a 15% lower height and assigned 36.2% more biomass to root than in T_{Base} ; nutrient concentration (N, P, and K) in root, stem (P) and leaves (N) was 5.5 to 41.3% higher in plants with high doses (T_{+50} and T_{+100}). Damage by frost produced seedlings with less height (5%) but larger diameter (13%) and nutrient concentration (between 5.5% for K in root and 28.9% for N in stem) than in undamaged plants. Modification of the size, biomass allocation and nutrient content of seedlings has important implications in the use of fertilization in the nursery to ensure better performance of seedlings in the field.

Key words: biomass allocation, seedling morphology, frost damage, seedling nutrition, seedling production.

INTRODUCCIÓN

La reforestación es una actividad necesaria para mitigar la alta tasa de deforestación en México (Wightman y Santiago, 2003), especialmente en las especies sujetas a perturbaciones antropogénicas desde tiempos precolombinos (Sánchez *et al.*, 2005) y que actualmente presentan poblaciones fragmentadas y dispersas. Sin embargo, el éxito de los programas de reforestación no es el esperado, debido a la reducida supervivencia de las plantas en campo, con apenas 57 % en el país; las principales causas de mortandad se atribuyen a condiciones ambientales adversas, como la sequía, y a la baja calidad de planta (CONAFOR, 2010).

Las características morfológicas de la planta producida en vivero son un factor importante para lograr un buen desempeño de ésta en el sitio de plantación (Mexal *et al.*, 2008). Se han derivado varios indicadores morfológicos como una medida fiable de la calidad y el desempeño posterior de la planta en campo (Thompson, 1985; Puttonen, 1997), dado que estas características se conservan después de la plantación (Grossnickle, 2012). Además, algunas de ellas (altura, diámetro del tallo, biomasa de raíz, biomasa total) juegan un papel clave en el funcionamiento hidráulico de la planta, lo que influye en su desempeño durante la exposición a sequía o a otros factores de estrés (McDowell *et al.* 2008). Por ello, los parámetros morfológicos son un componente importante que integra los atributos de la planta requeridos para el éxito en su supervivencia en campo (Ritchie *et al.*, 2010).

Las prácticas de cultivo en vivero pueden modificar las características morfológicas de las plantas y, con ello, aumentar su supervivencia y el éxito de la reforestación (Duryea 1984). En particular, el uso de fertilizantes en vivero modifica el crecimiento de las plantas y altera la asignación de recursos, por lo que es uno de los medios más utilizados para manipular las características morfológicas y fisiológicas de las plantas (Rook, 1991). Islam

et al. (2009) modificaron la relación altura/diámetro en plantas de *Pinus resinosa* al aumentar la dosis de N; se observó una respuesta similar en plantas de *Pinus resinosa* y *Abies fraseri* (Wilson *et al.*, 2012). Sin embargo, los efectos de la fertilización pueden ser muy variables y en algunos casos adversos, en función del sistema de producción de planta, el tamaño del contenedor, la velocidad de crecimiento de la especie, la dosis utilizada o el tiempo y forma de aplicación (Timmer, 1996; Millner y Kemp, 2012).

Los bosques de *Abies religiosa* del centro de México son recursos que proveen beneficios económicos, ecológicos, culturales, estéticos y recreativos a más de 20 millones de habitantes (Alvarado-Rosales y Hernández-Tejeda, 2002); destacan sus funciones de protección contra la erosión del suelo, de captación de agua y de regulación de la escorrentía (Hernández, 1985). Sin embargo, disturbios naturales y antropogénicos han ocasionado mortandad de arbolado y generado problemas de repoblación natural (Alvarado *et al.*, 1993; Blanco-García *et al.*, 2011). Esta situación ha generado una fragmentación y reducción drástica de las poblaciones naturales de la especie en esta región, que se encuentran ahora restringidas a pequeños manchones en sitios de alta montaña, en barrancas y laderas con pendientes fuertes, sombreadas y húmedas (Velázquez, 1994; Valenzuela *et al.*, 2004).

Para recuperar las poblaciones de *Abies religiosa* se requiere utilizar planta producida en vivero con características morfológicas y fisiológicas que les permitan tolerar las condiciones adversas del sitio de plantación y establecerse de manera efectiva. Sin embargo, no existe información sobre el efecto de la fertilización en plantas de esta especie, y su crecimiento, especialmente en contenedor, es extremadamente lento (Moreno *et al.*, 2002). Este trabajo tiene como objetivo evaluar el efecto de diferentes tratamientos de fertilización en la tasa de crecimiento, la morfología, la asignación de biomasa y el estado

nutrimental en plantas de *Abies religiosa* y analizar el efecto del daño en el brote terminal ocasionado por heladas en la respuesta de las plantas a la fertilización.

MATERIALES Y MÉTODOS

Material biológico y condiciones del estudio

Se utilizó semilla de *Abies religiosa* recolectada en 2004 en el Cerro Tlaloc, Delegación Milpa Alta, Distrito Federal (19° 06' 19" N, 98° 59' 1" O, 3,520 m). El ensayo se estableció en el Vivero San Luis Tlaxialtemalco de la Comisión de Recursos Naturales de la Secretaría de Medio Ambiente del Distrito Federal, en la Delegación Xochimilco (19° 16' 03" N, 99° 01' 46" O, 2,230 m). La semilla se desinfectó con hipoclorito de sodio al 6.5 % y con inmersión en una solución de *Trichoderma viride* (2.7×10^8 conidios ml⁻¹) antes de sembrar. La siembra se hizo el 20 julio de 2010, con dos semillas por cavidad en contenedores modelo Hiko V-93 (BCC®), de 93 ml de capacidad, 8.7 cm de alto y 4.1 cm de diámetro superior, en un sustrato de turba de musgo, vermiculita y perlita en proporción 50:30:20 en volumen; al finalizar la germinación se dejó una sola planta por contenedor. Durante los primeros 4 meses después de la germinación (15 agosto - 14 diciembre) todas las plantas recibieron la misma dosis de fertilización base (T_{Base}).

Tratamientos de fertilización

Los tratamientos de fertilización iniciaron el 15 de diciembre de 2010. Se usaron cuatro niveles de fertilización derivados del tratamiento base (T_{Base}) que se aplica en este vivero para la producción de *Abies religiosa* (Cuadro 1.1); los otros tres niveles incluidos representan dosis 50 % menor (T₋₅₀), y 50 (T₊₅₀) y 100 % (T₊₁₀₀) mayor que T_{Base}. Los tratamientos se aplicaron con el sistema de riego automatizado en hileras de 120 charolas dispuestas en 12 tarimas, asignadas de manera aleatoria a cada tratamiento (tres tarimas por

parcela con cuatro repeticiones, en un diseño completamente al azar). La dosis requerida se aplicó con el riego dos veces por semana, a partir de los productos comerciales Peters Professional® 9-45-15 y Peters Professional® 4-25-35 como fuentes principales de N, P y K, y de Fosfato monopotásico (KH₂PO₄) como fuente extra de K. Todos los tratamientos recibieron Nitrato de Calcio (Ca (NO₃)₂·4 H₂O) como fuente de Ca, 20 ppm de Mg y Fe, y 5 ppm de Cu, Mn, Zn y B mensualmente durante todo el ciclo de producción; el Mg, Fe, Cu, Mn y Zn se aplicaron en forma de fosfatos, y el B en forma de ácido bórico.

Cuadro 1.1. Dosis de N, P y K (ppm) por aplicación en el tratamiento testigo (T_{Base}) durante el ciclo de producción de *Abies religiosa* en el vivero.

| Elemento | Sep | Oct | Nov | Dic | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago |
|----------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| N | 25.0 | 25.0 | 28.1 | 25.0 | 46.9 | 37.5 | 62.5 | 75.0 | 94.4 | 94.4 | 50.0 | 50.0 |
| P | 0.0 | 61.4 | 70.5 | 61.4 | 118.2 | 81.9 | 142.5 | 163.7 | 204.6 | 208.0 | 132.0 | 136.5 |
| K | 0.0 | 108.1 | 113.9 | 108.1 | 167.2 | 144.1 | 182.6 | 103.8 | 129.8 | 166.5 | 309.9 | 363.2 |

En la semana del 8 al 14 de diciembre de 2010 se registraron temperaturas mínimas entre -1.3 y -7.1 °C en el vivero, que dañaron el brote terminal en las plantas de mayor tamaño en todo el ensayo (40 % de plantas dañadas). Al iniciar los tratamientos de fertilización se marcaron las plantas dañadas en cada uno de ellos para evaluar por separado su respuesta a la fertilización.

Muestreo de plantas y características evaluadas

El 15 de diciembre se identificó una muestra aleatoria de 20 plantas dañadas y 20 no dañadas en cada tratamiento (cinco plantas por repetición) para su medición periódica durante el ensayo. En cada una de ellas se midió la altura total y el diámetro en la base del

tallo, hasta el final del ciclo de producción en vivero a los 11 meses de edad. A los 10 meses de edad se midió el diámetro en la base del tallo en una muestra aleatoria de 125 plantas por tratamiento (30-35 plantas por repetición) y mediante la prueba de Ji-cuadrada se evaluó la distribución de las categorías diamétricas en cada tratamiento, considerado como una población. Con base en esta información y con el propósito de utilizar muestras más homogéneas entre tratamientos, a los 11 meses de edad se tomó una muestra adicional de 30 plantas (15 dañadas y 15 no dañadas) en cada tratamiento, con un diámetro entre 3.6 y 4.4 mm, para el análisis destructivo; a estas plantas se les midió la altura, el diámetro en la base del tallo, y la biomasa seca de raíz, tallo (incluye ramas) y follaje; con estos datos se estimó el índice de esbeltez, la relación parte aérea/raíz y el índice de calidad de Dickson de cada planta (Thompson, 1985).

Además, de cada componente de la planta se tomó una muestra de tejido para el análisis nutrimental (N, P y K); se utilizaron cinco muestras compuestas (cada una con tejido de tres plantas) por componente vegetal en cada tratamiento. Las muestras se molieron en un molino Thomas Wiley® Mini-Mill; el contenido de N se determinó por el método semimicro-Kjeldahl modificado para incluir nitratos (Bremmer, 1965), el P por emisión atómica, y K por absorción atómica (Allan, 1971).

Análisis estadístico de los datos

Para evaluar el efecto de la fertilización y del daño en el brote terminal ocasionado por las heladas en el crecimiento en altura y diámetro del tallo a lo largo del ciclo de producción, los datos mensuales de estas dos variables se analizaron con el modelo de medidas repetidas (Moser *et al.*, 1990), en un ANOVA de dos vías; en los casos en que se encontraron diferencias significativas ($p \leq 0.05$) entre tratamientos, se realizó la prueba de

comparación de medias de Tukey (SAS Institute, 2002). También se realizó un análisis de varianza de la tasa relativa de crecimiento (TRC) en altura y diámetro del tallo (Kramer y Kozlowski, 1979). En las muestras utilizadas para el análisis destructivo se realizó un ANOVA de dos vías para evaluar las diferencias en las características morfológicas (diámetro y altura), distribución de biomasa (peso seco de raíz, tallo, follaje y relación parte aérea/raíz), y estado nutrimental (concentración y contenido total).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Crecimiento de las plantas

La fertilización y el daño por helada al brote terminal afectaron el crecimiento en altura y diámetro de las plantas, pero la interacción no fue significativa (Cuadro 1.2), lo que indica una respuesta similar a la fertilización en plantas con y sin daño por helada. La dosis de fertilización no modificó de forma significativa ($p < 0.05$) el crecimiento promedio en altura y diámetro de las plantas durante el ciclo de producción, pero sí en el último mes, al igual que la tasa relativa de crecimiento (Cuadro 2); esto se debe al crecimiento lento de la especie en vivero (Moreno *et al.*, 2002), por lo que se requiere un periodo prolongado (al menos 7 meses) para que se manifieste el efecto de la fertilización en el tamaño de la planta.

Las plantas con las dosis de fertilización intermedias (T_{Base} y T_{+50}) alcanzaron el mayor tamaño promedio y la mayor TRC en altura y diámetro al final del ciclo de producción (Figura 1.1). El menor crecimiento de las plantas en el tratamiento T_{-50} es esperado, pero no el de las plantas con la dosis T_{+100} ; sin embargo, el análisis del contenido nutrimental podría ayudar a explicar las diferencias en crecimiento en estos tratamientos.

Cuadro 1.2. Significancia estadística (p) del efecto de la fertilización y daño al brote terminal en el crecimiento en altura y diámetro de plantas de *Abies religiosa* durante el periodo de producción en vivero (TRC= tasa relativa de crecimiento).

| Factor | Altura | | | Diámetro | | |
|-------------------|-------------|----------|--------|--------------|----------|-------|
| | 4 a 11meses | 11 meses | TRC | 4 a 11 meses | 11 meses | TRC |
| Fertilización (F) | 0.658 | <0.001 | <0.001 | 0.193 | <0.001 | 0.033 |
| Daño al brote (D) | 0.114 | 0.010 | <0.001 | <0.001 | <0.001 | 0.110 |
| F X D | 0.391 | 0.475 | 0.467 | 0.444 | 0.203 | 0.196 |

El daño por la helada afectó de manera distinta el crecimiento en altura y diámetro de las plantas; las plantas dañadas alcanzaron menor tamaño en altura (5 %) pero mayor diámetro (13 %), efecto más notorio al final del ciclo de producción (Figura 1.2); sin embargo, no hubo diferencias significativas en la TRC en diámetro entre los dos grupos de plantas. Al parecer, la helada dañó el brote apical de las plantas de mayor tamaño y ocasionó en ellas un retraso en el alargamiento de un nuevo brote lateral para remplazar el brote dañado, por lo que terminaron con una menor altura promedio; al retrasar el crecimiento en altura de las plantas dañadas (de mayor tamaño) se favoreció el crecimiento en diámetro y mantuvieron la ventaja inicial hasta el final del ciclo, pero sin modificar su tasa relativa de crecimiento (Figura 1.2).

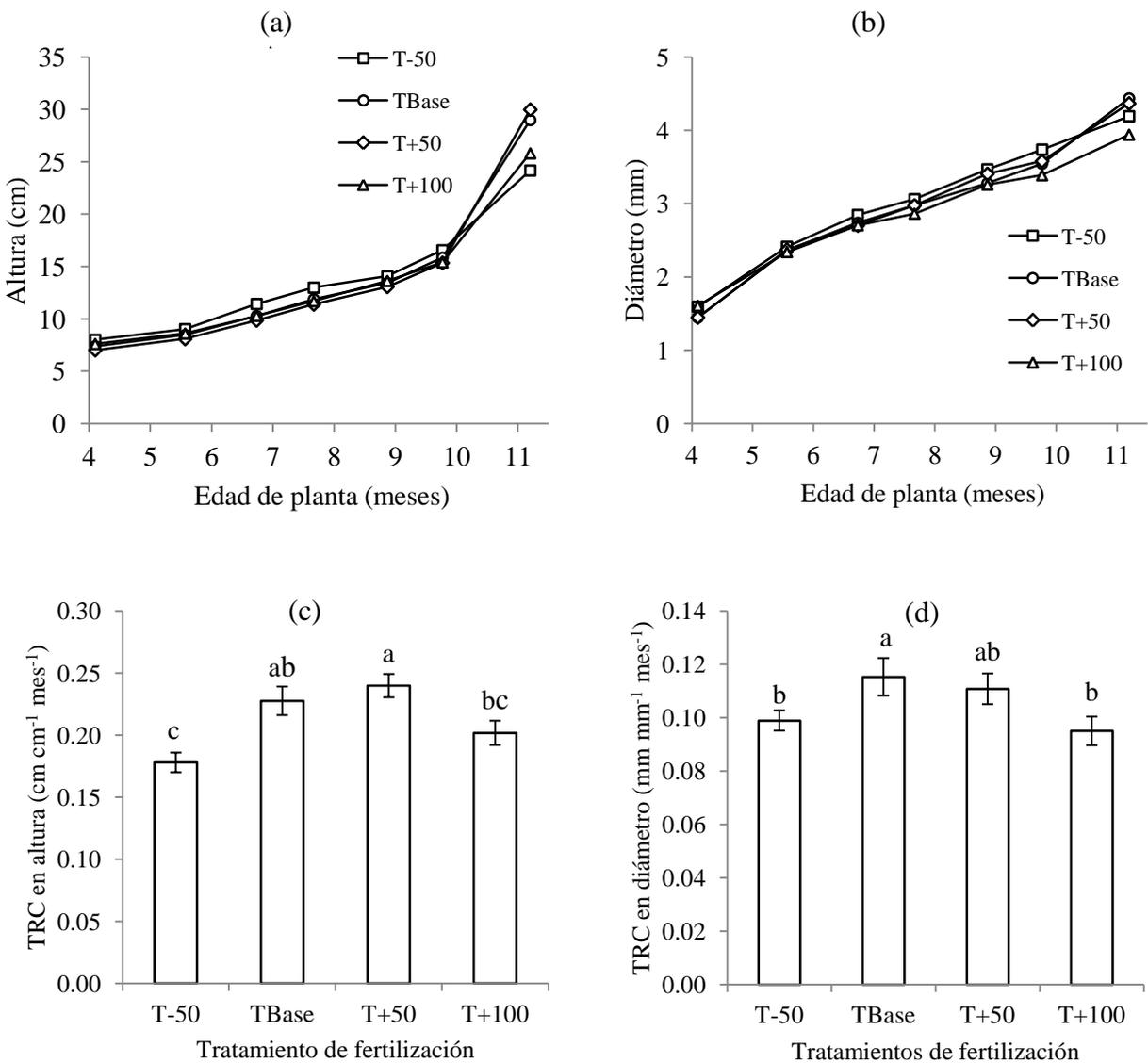


Figura 1.1. Efecto de la dosis de fertilización en el crecimiento promedio y TRC en altura (a, c) y diámetro (b, d) de plantas de *Abies religiosa* en vivero. En las Figuras c y d, barras con letra distinta son diferentes ($p \leq 0.05$).

En el muestreo realizado a los 10 meses de edad el diámetro del tallo varió desde la categoría de 1 mm (1.6 %) hasta la de 5 mm (0.5 %) en todos los tratamientos, aunque el 56.8 % se concentró en la categoría de 3 a 4 mm (Figura 1.3). La prueba de Ji-cuadrada no indicó diferencias significativas ($p = 0.128$) entre los tratamientos en la distribución de

frecuencias diamétricas de las plantas. De acuerdo con el tamaño estándar en diámetro (≥ 3 mm) del Vivero San Luis para fines de restauración, el 75.4 % de la población cumple con este tamaño.

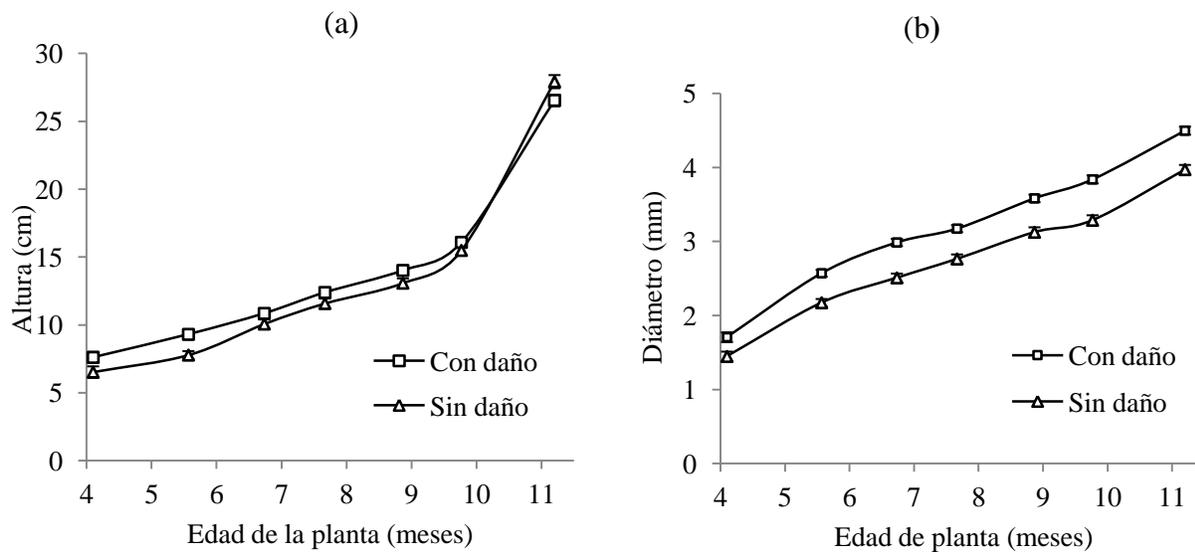


Figura 1.2. Efecto del daño por helada en el brote sobre el crecimiento en altura (a) y diámetro (b) de plantas de *Abies religiosa* en vivero.

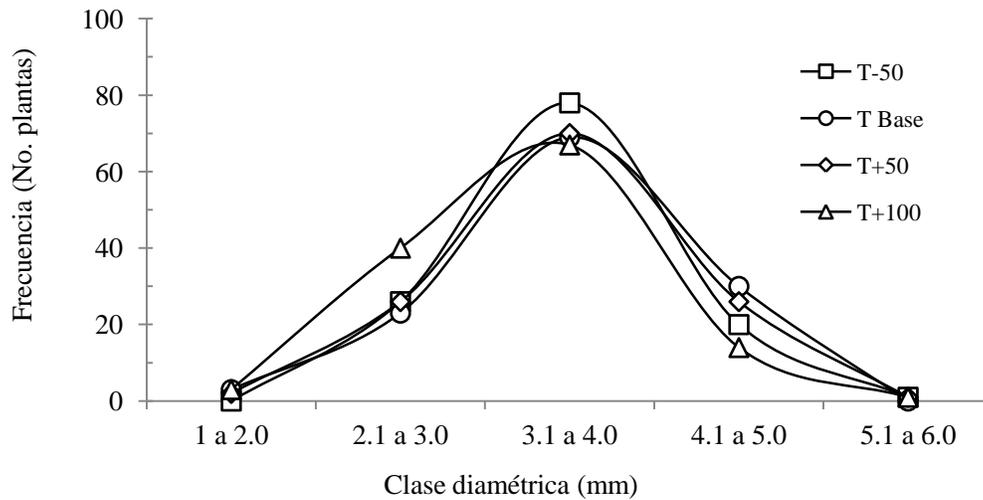


Figura 1.3. Distribución de frecuencias diamétricas en plantas de *Abies religiosa* a los 10 meses de edad en vivero.

Características morfológicas y distribución de biomasa

La dosis de fertilización modificó de forma significativa ($p < 0.05$) la altura de la planta y la asignación de biomasa a la raíz en plantas de una misma categoría diamétrica (Cuadro 1.3). Este efecto también se manifestó en los índices morfológicos, el índice de esbeltez, la relación parte aérea/raíz y el índice de calidad de Dickson (Cuadro 1.3). En cambio, el daño por helada al brote terminal solo afectó la altura de la planta y, en consecuencia, el índice de esbeltez (Cuadro 1.3).

Cuadro 1.3. Significancia estadística (p) del efecto de la fertilización y daño del brote en las características morfológicas de las plantas de *Abies religiosa* al final del ciclo de producción en vivero.

| Factor | Altura | Diámetro | PSR [†] | PST | PSF | IE | RPAR | ICD |
|-------------------|--------|----------|------------------|-------|-------|--------|--------|--------|
| Fertilización (F) | <0.001 | 0.196 | <0.001 | 0.506 | 0.074 | 0.002 | <0.001 | <0.001 |
| Daño al brote (D) | <0.001 | 0.235 | 0.171 | 0.234 | 0.720 | <0.001 | 0.186 | 0.494 |
| F X D | 0.990 | 0.825 | 0.806 | 0.194 | 0.333 | 0.976 | 0.323 | 0.714 |

[†]PSR = peso seco de raíz; PST = peso seco de tallo; PSF = peso seco de follaje; IE = índice de esbeltez; RPAR = relación parte aérea/raíz; ICD = índice de calidad de Dickson.

Las plantas con la menor dosis (T_{-50%}) presentaron la menor talla en altura (15 % menos que en el testigo), pero asignaron la mayor cantidad de biomasa a la raíz (36.2 % más que en el testigo), por lo que también presentaron el menor índice de esbeltez, la menor relación parte aérea/raíz y el mayor índice de calidad de Dickson (Cuadro 1.4). La reducción del crecimiento en algunas especies de coníferas se asocia con niveles bajos en nutrimentos, especialmente N, el cual limita el crecimiento en altura. Sin embargo, este factor también puede modificar el crecimiento de otros órganos de la planta, como el tamaño del sistema radical.

Cuadro 1.4 Valores promedio por tratamiento de fertilización de las características morfológicas y biomasa de las plantas de *Abies religiosa* al final del ciclo de producción en vivero.

| Trat. | Altura (cm) | Diámetro (mm) | PSR [†] (g) | PST (g) | PSF (g) | IE | RPAR | ICD |
|-------------------|---------------------|---------------|----------------------|---------|---------|--------|-------|--------|
| T ₋₅₀ | 25.6 b [¶] | 4.3 a | 1.28 a | 1.28 a | 1.72 a | 6.0 b | 2.6 b | 0.53 a |
| T _{Base} | 30.3 a | 4.2 a | 0.94 bc | 1.31 a | 1.68 a | 7.2 a | 3.3 a | 0.38 b |
| T ₊₅₀ | 31.2 a | 4.4 a | 0.83 c | 1.39 a | 1.74 a | 7.1 a | 3.9 a | 0.37 b |
| T ₊₁₀₀ | 29.3 a | 4.3 a | 1.08 ab | 1.43 a | 2.01 a | 6.8 ab | 3.4 a | 0.47ab |

[†]PSR = peso seco de raíz; PST = peso seco de tallo; PSF = peso seco de follaje; IE = índice de esbeltez; RPAR = relación parte aérea/raíz; ICD= índice de calidad de Dickson.

[¶]Valores promedio en una misma columna seguidos de distinta letra son diferentes ($p \leq 0.05$).

En este trabajo las plantas con una dosis baja de nutrientes fueron las de menor altura y mayor biomasa de raíz, indicativo de un sistema radical más grande, que permite una mayor exploración del suelo en busca de nutrientes. Estas plantas también alcanzaron

un mayor equilibrio entre sus partes área y radical (IE, RPAR e ICD), lo cual les podría proporcionar ventajas competitivas en un sitio de plantación con poca humedad en el suelo (Zweifel *et al.*, 2007; McDowell *et al.*, 2008). Estas características favorecen el contacto de raíces finas con agua de alta tensión de micro poros del suelo y ayudan a tolerar sequía (Grossnickle, 2000; Gomez *et al.*, 2002), principal factor de estrés que limita el éxito de la reforestación (Margolis y Brand, 1990). Además, un mayor equilibrio entre la raíz y la parte aérea y un sistema radicular fibroso proporcionan mayor oportunidad de supervivencia (Grossnickle, 2005). Hines y Long (1986) encontraron que plantas de *Picea engelmannii* de mayor tamaño crecen mejor que las más pequeñas en sitios con humedad adecuada y competencia vegetal, pero en sitios propensos al estrés hídrico la ventaja es para las plantas con un sistema radical grande y menor superficie de transpiración (Ritchie *et al.*, 2010).

Concentración y contenido de nutrientes

En general, la fertilización y el daño por helada afectaron de manera significativa ($p < 0.05$) la concentración de N, P y K en el tejido vegetal, aunque el efecto no fue similar entre los nutrientes ni entre los componentes de la planta (Cuadro 1.5); la fertilización también afectó el contenido total de nutrientes (Cuadro 1.5). La interacción entre los dos factores solo fue significativa para la concentración de N en la raíz y en las hojas, por lo que, en términos generales, la respuesta de las plantas a la fertilización no se modificó por el daño ocasionado por la helada al brote terminal.

Cuadro 1.5. Significancia estadística (p) del efecto de la fertilización y del daño al brote terminal en la concentración de Nitrógeno (N), Fósforo (P) y Potasio (K) en raíz, tallo y hojas y en su contenido total en plantas de *Abies religiosa*.

| Factor | Concentración | | | | | | | | | Contenido | | |
|-------------------|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|-------|-------|
| | Raíz | | | Tallo | | | Hojas | | | Planta | | |
| | N | P | K | N | P | K | N | P | K | N | P | K |
| Fertilización (F) | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.081 | 0.001 | 0.223 | 0.001 | 0.157 | 0.294 | 0.004 | 0.325 | 0.032 |
| Daño (D) | 0.001 | 0.001 | 0.014 | 0.002 | 0.001 | 0.081 | 0.187 | 0.042 | 0.543 | 0.948 | 0.189 | 0.866 |
| F X D | 0.008 | 0.064 | 0.085 | 0.422 | 0.374 | 0.192 | 0.004 | 0.608 | 0.295 | 0.340 | 0.891 | 0.711 |

Las menores concentraciones de nutrientes en la raíz (N, P, y K), en el tallo (P) y en las hojas (N), así como el menor contenido total de N en la planta se observaron en T₋₅₀ (Cuadro 6); las mayores concentraciones de los mismos nutrientes se observaron en T₊₅₀ y T₊₁₀₀, con diferencias de entre 5.5 % (en el caso de P en tallo) y 41.3% (en el caso de N en raíz), y de 32 % en el contenido total de N en la planta, con respecto a los valores en T₋₅₀ (Cuadro 6). En el caso de K, las plantas en T₊₅₀ y T₊₁₀₀ presentaron los valores extremos en contenido total (Cuadro 1.6), debido a sus diferencias en biomasa (Cuadro 1.4).

Cuadro 1.6. Valores promedio de concentración de Nitrógeno (N), Fósforo (P) y Potasio (K) en raíz, tallo y hojas y su contenido total, por tratamiento de fertilización en plantas de *Abies religiosa*.

| Trat. | Concentración (g kg ⁻¹) | | | | | | | | | Contenido | | |
|-------------------|-------------------------------------|-------|--------|--------|-------|--------|---------|-------|--------|----------------------------|--------|---------|
| | Raíz | | | Tallo | | | Hojas | | | (mg planta ⁻¹) | | |
| | N | P | K | N | P | K | N | P | K | N | P | K |
| T _{.50} | 8.3 c [†] | 4.4 b | 13.3 b | 8.4 a | 3.1 b | 12.4 a | 16.5 c | 6.7 a | 16.5 a | 49.6 b | 21.1 a | 60.9 ab |
| T _{Base} | 9.8 b | 5.6 a | 14.8 a | 9.2 a | 3.2 b | 12.4 a | 18.0 bc | 6.8 a | 17.0 a | 51.0 b | 20.8 a | 58.7 ab |
| T ₊₅₀ | 11.7 a | 6.2 a | 14.9 a | 10.9 a | 3.7 a | 12.5 a | 21.3 a | 7.3 a | 16.3 a | 61.3 ab | 22.8 a | 58.0 b |
| T ₊₁₀₀ | 10.1 b | 5.7 a | 15.4 a | 9.1 a | 3.3 b | 13.7 a | 20.7 ab | 6.5 a | 18.0 a | 65.7 a | 23.6 a | 71.3 a |

[†]Valores promedio en una misma columna seguidos de distinta letra son diferentes ($p \leq 0.05$).

A pesar de las diferencias observadas, todos los tratamientos de fertilización presentaron concentraciones de N, P y K en el follaje dentro o superiores al rango de suficiencia de Landis (1985) para especies de coníferas producidas en contenedor. Las concentraciones de P y K en tallo y raíz, pero no las de N, también fueron superiores a los valores encontrados en *Pinus resinosa* (Timmer y Armstrong, 1987). Es posible que el N haya presentado un efecto de dilución en la raíz en las plantas del tratamiento T_{.50}, al producir la mayor biomasa de raíz (Cuadro 1.4).

Un mayor contenido de N podría proporcionar ventajas competitivas a las plantas al enfrentar condiciones de baja fertilidad en el suelo, o servir como reserva para un mayor crecimiento en campo. Sin embargo, también podría ocasionar desventajas ante condiciones climáticas adversas, ya que altas concentraciones de N en hojas se relacionan con daños por bajas temperaturas en especies de coníferas, debido a la extensión del periodo de

crecimiento de la planta que aumenta la susceptibilidad a daños por heladas tempranas (Benzian *et al.*, 1974; Rook, 1991). Aronsson (1980) encontró en *Picea sylvestris* la máxima resistencia al frío cuando las concentraciones de N en las acículas estuvieron entre 1.3-1.8 %; plantas con concentraciones fuera de este intervalo presentaron daños por heladas.

El K se asocia con la capacidad de ajuste osmótico y la apertura de estomas en las plantas (Davies y Zhang, 1991; Kearws y Assmann, 1993), por lo que una mayor concentración de este elemento en el follaje podría proporcionar ventajas competitivas y favorecer su establecimiento en ambientes con escasez de agua y altas temperaturas.

En los casos donde se encontró un efecto significativo del daño por la helada, las plantas dañadas presentaron una mayor concentración nutrimental (entre 5.5 % para K en raíz y 28.9 % para N en tallo) que las plantas no dañadas (Cuadro 1.7). Esto se debe en mayor grado a un efecto de dilución en las plantas sanas, debido al mayor crecimiento y biomasa en algunos de sus componentes, ya que no hubo diferencias en el contenido total de nutrientes entre los dos grupos. Sin embargo, concentraciones mayores en tejidos de almacenamiento como raíces y tallo representan una fuente de energía para la planta después del trasplante en campo, lo cual podría influir en su establecimiento y desempeño posterior.

Cuadro 1.7. Valores promedio de concentración de Nitrógeno (N), Fósforo (P) y Potasio (K) en raíz, tallo y hojas, por condición del brote en plantas de *Abies religiosa*.

| Condición del brote | Concentración (g kg ⁻¹) | | | | | | | | |
|---------------------|-------------------------------------|-------|--------|--------|-------|--------|--------|-------|--------|
| | Raíz | | | Tallo | | | Hojas | | |
| terminal | N | P | K | N | P | K | N | P | K |
| sin daño | 9.5 b [†] | 5.2 b | 14.2 b | 8.2 b | 3.1 b | 12.3 a | 19.7 a | 6.5 b | 17.1a |
| dañado | 10.3 a | 5.8 a | 15.0 a | 10.6 a | 3.5 a | 13.2 a | 18.6 a | 7.1 a | 16.7 a |

[†]Valores promedio en una misma columna seguidos de la misma letra no son diferentes con p = 0.05.

CONCLUSIONES

Abies religiosa presentó una respuesta positiva a la dosis de fertilización en el crecimiento en altura y diámetro. Aunque no se encontraron diferencias entre tratamientos en la distribución de categorías diamétricas, las plantas con dosis intermedias alcanzaron el mayor tamaño promedio al final del periodo de producción. La dosis de fertilización también modificó la biomasa total, la asignación de biomasa a la raíz y la concentración de N, P y K en los componentes de la planta; el tratamiento con menor dosis generó plantas de menor altura, con mayor asignación de biomasa a la raíz, menor concentración de N, P y K en raíz, P en tallo, N en hojas, y menor contenido total de N en la planta. Estos resultados tienen implicaciones importantes para el uso de la fertilización en la producción de plantas en vivero y su efecto en el desempeño posterior de las plantas en campo.

El daño por helada en el brote terminal también modificó el crecimiento, la asignación de biomasa y la concentración de nutrientes en los componentes de las plantas. Las plantas dañadas resultaron de menor tamaño en altura pero con mayor diámetro, características que se relacionan de manera positiva con el establecimiento de las plantas bajo condiciones de estrés hídrico y térmico en el sitio de plantación; también presentaron una mayor concentración nutrimental en raíz y tallo, lo que podría constituir una reserva nutrimental importante para su desempeño y supervivencia si se plantan en suelos de baja fertilidad.

CAPITULO 2. EFECTO DE LA FERTILIZACIÓN Y DAÑO POR HELADAS EN VIVERO SOBRE LA SUPERVIVENCIA Y CRECIMIENTO EN CAMPO DE PLANTAS DE *Abies religiosa*

RESUMEN

Las prácticas de cultivo en vivero que promueven el crecimiento del sistema radicular y un adecuado nivel nutrimental mejoran el desempeño de la planta en campo. El concepto de planta objetivo considera la calidad de planta y el ambiente del sitio de plantación de manera integral, lo que permite identificar las características morfológicas y fisiológicas que están relacionadas con el desempeño en campo en un ambiente particular. El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de la fertilización y del daño por heladas en diferentes características morfológicas y fisiológicas de las plantas y su relación con la supervivencia, y crecimiento de las plantas en dos ambientes de plantación con condiciones contrastantes S_1 y S_2). Para ello, se utilizaron plantas producidas con cuatro niveles de fertilización (T_{-50} , T_{Base} , T_{+50} y T_{+100}), dos condiciones del brote apical (sano y dañado) y las categorías diamétricas D_1 y D_2 en el tratamiento T_{Base} . Todas las plantas produjeron una cantidad abundante de raíces nuevas en la prueba de crecimiento potencial de raíz, sin diferencias significativas entre tratamientos. Sin embargo, la dosis de fertilización y el daño por heladas y la categoría diamétrica modificaron la tolerancia a la deshidratación de las raíces en las plantas; las plantas en los tratamientos T_{-50} y T_{+100} presentaron la mayor tolerancia a la deshidratación, lo que puede estar relacionado con el mayor equilibrio en la asignación de recursos en estas plantas, al igual que en plantas con daño por heladas en el brote terminal y de un mayor diámetro del tallo (D_2) las cuales presentaron un efecto positivo en la tolerancia a la deshidratación de la raíz. Un año después de la plantación, la mortalidad en S_2 , el sitio de mayor elevación, menor humedad del suelo y mayor fluctuación de temperatura fue 84% mayor que en S_1 ; además, el nivel de tolerancia a la deshidratación de las plantas con diferente dosis de fertilización se relacionó con la supervivencia de las plantas en S_2 pero no en S_1 . En S_1 las plantas crecieron en promedio casi 12 cm más en altura que en S_2 , con una TRC cuatro veces mayor y un inicio más temprano del alargamiento de la yema terminal. La fertilización tuvo un efecto positivo sobre el crecimiento de la planta, especialmente en el ciclo 2011 y en la TRC en diámetro, lo que podría representar una ventaja competitiva en el crecimiento, pero no modificó la fenología de la yema terminal. El daño por heladas en el brote terminal solo influyó en la altura final de la planta y en la fenología de la yema terminal, y la categoría diamétrica no afectó ninguna variable de crecimiento ni la fenología de la yema terminal. Los resultados indican que la selección de las plantas con condiciones fisiológicas y morfológicas idóneas para cada ambiente de plantación debe ir acompañada de una selección cuidadosa de los sitios de plantación que reúnan las condiciones mínimas del nicho ecológico de la especie.

Palabras clave: raíces nuevas, tolerancia a la deshidratación, sitios de plantación, desempeño de la planta, fenología de la yema.

SUMMARY

Nursery practices that promote root growth and adequate nutrition improve field performance of seedlings. The concept of target seedling considers both seedling quality and environment of plantation site, allowing you to identify the morphological and physiological traits related to field performance of seedling in a particular environment. The objective of this study was to assess the effect of fertilization and frost damage on different morphological and physiological traits of seedlings and their relationship with seedling survival and growth in two planting environments with contrasting conditions (S₁ and S₂). Seedlings produced with four levels of fertilization (T₋₅₀, T_{Base}, T₊₅₀ and T₊₁₀₀), two conditions of the apical bud (healthy and damaged) and stem diameter (D₁ and D₂) in the T_{Base} treatment were used. All plants produced an abundant amount of new roots in the root growth potential test, without significant differences among treatments. However, the dose of fertilization, frost damage, and diameter size modified seedling tolerance to root dehydration; seedlings in T₋₅₀ and T₊₁₀₀ treatments showed greater dehydration tolerance, which may be related to greater balance in resource allocation, as well as in seedlings with frost damage in the terminal shoot, or with a greater stem diameter (D₂), which had a positive effect in tolerance to root dehydration. One year after planting, mortality in S₂, the highest elevation site, with less soil moisture and greater temperature fluctuation was 84% greater than in S₁; tolerance to root dehydration in seedlings with different fertilization doses was related to seedling survival in S₂ but not in S₁. At S₁, seedlings grew on average almost 12 cm more in height than in S₂, with a four-fold higher RGR and early onset of terminal shoot elongation. Fertilization had a positive effect on seedling growth, especially in the 2011 cycle and the RGR in diameter, which could represent a competitive advantage in growth, but did not modify the terminal bud phenology. Frost damage in the terminal shoot only influenced the final height of seedling and the phenology of the terminal bud, and diameter size did not affect any growth variable and terminal bud phenology. Results suggest that selection of seedlings with appropriate physiological and morphological traits for each plantation environment must be accompanied by a careful selection of planting sites which meet the minimum requirements of the ecological niche of the species.

Key words: new roots, dehydration tolerance, plantation sites, seedling performance, bud phenology.

INTRODUCCIÓN

Las actividades antropogénicas son la principal causa de perturbación de los ecosistemas forestales (Keyes, 1996; Vitousek *et al.*, 1997; Endara *et al.*, 2012). La fragmentación, degradación y destrucción del hábitat que se origina afecta la biodiversidad y la disponibilidad de los bienes y servicios en dichos ecosistemas (Saunders *et al.*, 1991; Naeem *et al.*, 1994; Kozlowski, 2002; Zipperer *et al.*, 2012). Para recuperar en parte estos bienes y servicios es necesario poner en práctica los principios de restauración ecológica (Ciccarese *et al.*, 2012)

Existen muchos factores que inciden en el éxito de la restauración ecológica; algunos de ellos son la selección de especies y de las fuentes genéticas adaptadas a las condiciones del sitio (Zobel y Talbert, 1984), el manejo previo de las plantas en vivero (Lavender *et al.*, 1990), las actividades de preparación y mejora del ambiente en el sitio (Duryea y Dougherty, 1991), la fecha de establecimiento (Hobbs *et al.*, 1992; Grossnickle, 2000) y método de plantación (Ciccarese *et al.*, 2012). La supervivencia y desempeño inicial de las plantas son decisivos en el proceso de restauración, ya que influyen en la dinámica poblacional y en los atributos estructurales futuros del ecosistema (Margolis y Brand, 1990).

Las prácticas de cultivo en vivero que producen planta de mayor calidad y que promueven el crecimiento del sistema radicular y un adecuado nivel nutrimental mejoran el establecimiento y supervivencia de la planta en campo (Rook, 1991; Tsakaldimi *et al.*, 2009); un crecimiento rápido de la raíz aumenta la capacidad de absorción y transporte de agua y nutrientes, lo que favorece la supervivencia y crecimiento de las plantas (Chirino *et al.*, 2008). Estos efectos son más notorios en sitios que presentan periodos de sequía y bajas temperaturas (heladas), ya que en esas condiciones las plantas son más vulnerables.

CONAFOR (2010) identifica a esos factores, asociados con una mala calidad de planta, como las principales causas que reducen el éxito de la reforestación en México. El concepto de planta objetivo considera la calidad de planta y el ambiente del sitio de plantación de manera integral (Ritchie *et al.*, 2010), lo que permite identificar las características morfológicas y fisiológicas que están relacionadas con el desempeño en campo en un ambiente particular (Rose *et al.*, 1990; Landis y Dumroese, 2006).

La morfología de las plantas tiene un papel importante en su establecimiento en campo; una mayor área foliar permite una mayor capacidad fotosintética, mayor tasa de crecimiento y mayor capacidad para competir por los recursos del sitio (Grossnickle, 2000; Oliet *et al.*, 2009b). Sin embargo, también es importante mantener un equilibrio entre el consumo de agua y la capacidad de absorción de las raíces, por lo que plantas con un área foliar excesiva podrían tener desventajas en condiciones ambientales con una elevada demanda hídrica que puede complicarse con poca humedad en el suelo (Lamhamedi *et al.*, 1997; South *et al.*, 2001). Dado que las plantas con un buen desarrollo del sistema radical pueden superar estas condiciones adversas (Tsakalidimi *et al.*, 2013), se podría utilizar la biomasa de raíz (Ritchie y Dunlap, 1980), la relación parte aérea/raíz (Thompson, 1985; Rose *et al.*, 1997), o la tolerancia a la deshidratación como indicadores del desempeño de la planta (Davis y Jacobs, 2005), especialmente en sitios con déficit hídrico (Birchler *et al.*, 1998).

La fertilización en vivero juega un papel importante en el desempeño de las plantas en campo (Rook, 1991), al promover una mayor acumulación de nutrimentos durante el cultivo, en preparación para las condiciones adversas de campo (Timmer, 1996; Oliet *et al.*, 2009a); plantas con un nivel adecuado de nutrimentos usualmente muestran mayor supervivencia, crecimiento y capacidad competitiva en campo (Oliet *et al.*, 2011). Sin

embargo, el régimen de fertilización también puede modificar de manera negativa las características morfológicas (Rook, 1991) y el equilibrio entre la parte aérea y la raíz (Villar-Salvador *et al.*, 2004a) o la tolerancia a la deshidratación (Trubat *et al.*, 2008).

A pesar de esto, existe poca información sobre el efecto del régimen de fertilización en la supervivencia y desempeño posterior de las plantas en campo. La mayoría de los estudios se centran en relacionar la morfología de las plantas en vivero con el crecimiento, pero muy pocos toman en cuenta características fisiológicas para predecir el desempeño en campo. En el caso particular a pesar de que los bosques de *Abies religiosa*, (especie endémica de México) enfrentan severos problemas de perturbación y dificultad para su restauración ecológica, no existe información sobre indicadores morfológicos o fisiológicos asociados a su desempeño posterior en campo. El objetivo de este trabajo es cubrir la falta de conocimiento mediante un estudio que evalúa el efecto de la fertilización y del daño por heladas en diferentes características morfológicas y fisiológicas de las plantas y su relación con la supervivencia y crecimiento posterior en dos ambientes de plantación.

MATERIALES Y MÉTODOS

Material biológico y condiciones del estudio

La planta se produjo en el Vivero San Luis Tlaxiátemalco en la Delegación Xochimilco (19° 16' 03" N, 99° 01' 46" O, 2,230 m), con semilla de *Abies religiosa* recolectada en el Cerro Tlaloc, Delegación Milpa Alta, Distrito Federal (19° 06' 19" N, 98° 59' 1" O, 3,520 m). Antes de la siembra, la semilla se desinfectó con hipoclorito de sodio al 6.5 % y se sumergió en una solución de *Trichoderma viride* (2.7×10^8 conidios ml⁻¹). Durante los primeros cuatro meses después de la germinación (15 Agosto - 14 Diciembre) todas las plantas recibieron la misma dosis de fertilización base (T_{Base}). A partir del quinto mes se

aplicaron cuatro niveles de fertilización derivados del tratamiento base (T_{Base}), los tres niveles incluidos representan dosis 50 % menor (T_{-50}) y 50 (T_{+50}) y 100 % (T_{+100}) mayor que T_{Base} (ver Capítulo 1). En la segunda semana de diciembre de 2010 se registraron temperaturas mínimas entre -1.3 y -7.1 °C en el vivero, que dañaron el brote terminal en las plantas; por ello, al iniciar los tratamientos de fertilización se marcaron las plantas dañadas en cada uno de ellos para evaluar por separado la respuesta a los tratamientos.

Características evaluadas al final de la etapa de vivero

Con el propósito de utilizar plantas de tamaño homogéneo entre tratamientos, y con base en el muestreo realizado a los 11 meses de edad (ver Capítulo 1), en las evaluaciones realizadas al final de la etapa de vivero (crecimiento potencial de raíz y tolerancia a la deshidratación) y en el ensayo de campo se utilizaron plantas con un diámetro en la base del tallo entre 3.6 y 4.4 mm (D_1) y, en algunos casos, entre 4.5 a 5.4 mm (D_2) como una categoría distinta de tamaño.

Para evaluar el crecimiento potencial de raíz se tomó una muestra al azar de 25 plantas de la categoría D_1 por tratamiento de fertilización con y sin daño por heladas y una muestra adicional de 25 plantas de la categoría D_2 sin daño por heladas en el tratamiento base (T_{Base}), para un total de nueve tratamientos. Las plantas se colocaron en macetas de 8 L con un sustrato de turba de musgo, vermiculita y perlita en una proporción 50:30:20, en grupos de 5 plantas por maceta con 5 repeticiones por tratamiento, en un diseño experimental completamente al azar. Las macetas se mantuvieron por un periodo de 30 días con una humedad cercana a capacidad de campo (≈ 35 %) y una temperatura de 23 ± 9 °C en el sustrato. Al final del periodo, las plantas se retiraron de la maceta, se separó el sustrato con un lavado y se cortaron los ápices de las raíces nuevas generadas durante el periodo de

prueba; las raíces se secaron en un horno (SHEL LAB® FX14®) a 70 °C hasta alcanzar un peso constante y se pesaron en un balanza analítica (AND® serie GR120®) para obtener la biomasa de raíces nuevas y viejas.

Para evaluar la tolerancia a la deshidratación de la raíz se utilizó una muestra adicional de 25 plantas de los nueve tratamientos descritos en el párrafo anterior. En este caso, el sistema radical de las plantas se expuso durante 4 horas a una temperatura de 30 ± 0.5 °C y una humedad relativa promedio de 40 % dentro de una cámara de ambiente controlado (BINDER®; KBW-400®) en grupos de cinco plantas con cinco repeticiones por tratamiento, en un diseño experimental de bloques completos al azar; al finalizar el periodo de estrés los grupos de plantas se colocaron en macetas de 8 L con un sustrato de turba de musgo, vermiculita y perlita en una proporción 50:30:20. Las plantas se regaron a capacidad de campo y se mantuvieron en condiciones similares a las de la prueba de crecimiento potencial de raíz. Se registró el número de plantas muertas cada 3 días durante un mes para medir la respuesta de las plantas al estrés por deshidratación.

Establecimiento de las plantas en campo

La plantación se hizo en el mes de Agosto de 2011 en dos sitios del Volcán Pelado, Delegación Tlalpan, Distrito Federal. El primer sitio de plantación (S₁, “La Rosa”) se ubica en las coordenadas 19° 08’24” N 99° 13’17” O, a 3300 m; es un sitio plano, con exposición cenital, suelos profundos (> 36 cm) y con un dosel cercano al cierre de copas; el segundo sitio (S₂, “Lado Oeste”) se ubica en las coordenadas 19° 08’49” N y 99° 13’ 14” O, a 3500 m; es un sitio con pendiente moderada, exposición Sur-Oeste, suelos someros (< 36 cm) y con un dosel mínimo de copas.

La plantación se hizo por el método de cepa común en una distribución de marco real a un espaciamiento de 1.5 x 1.5 m en ambos sitios. En cada sitio se utilizaron cinco bloques con seis parcelas de 20 plantas (un total de 600 plantas por sitio), asignadas en forma aleatoria a los tratamientos generados en vivero. Debido a diferencias en la cantidad de plantas disponibles de cada tratamiento no fue posible que los dos sitios de plantación fueran réplicas idénticas. En S₁ se incluyeron tres niveles de fertilización (T₋₅₀, T_{Base}, y T₊₅₀) con plantas de categoría D₁ sin daño por heladas, además de los tratamientos T₊₁₀₀ y T₋₅₀ con plantas D₁ dañadas por heladas y del tratamiento T_{Base} con plantas de categoría D₂ sin daño por heladas; en S₂ se incluyeron los mismos tratamientos que en S₁, excepto que el tratamiento T₊₁₀₀ estuvo representado en tres bloques por plantas D₁ sin daños por heladas y en dos bloques por plantas D₁ con daños por heladas.

Características evaluadas en campo

Al momento de la plantación se midió el diámetro y altura del tallo en cada una de las plantas y un año después se midieron las mismas características en las plantas vivas y la longitud del brote terminal para calcular la tasa relativa de crecimiento en altura y diámetro, la longitud del brote en el ciclo de crecimiento 2012 y en el ciclo 2011 después de plantar. El 28 de Marzo de 2012, al inicio del periodo de crecimiento del brote, se evaluó el estado fenológico de la yema terminal en cada planta, con una escala de 1 a 3, con intervalos de 0.5, en donde el 1 corresponde a una yema apical cubierta totalmente por las brácteas y el 3 a un brote en crecimiento (más de 2 cm de longitud).

A partir de la fecha de plantación, cada 4-5 semanas se contó el número de plantas muertas por parcela, para determinar el porcentaje de mortandad; en las mismas fechas se estimó la humedad del suelo a una profundidad de 12 cm con un TDR (FieldScout®)

TDR300®), a lo largo de un transecto diagonal con 6 puntos de muestreo por bloque en cada sitio. Además, durante todo el periodo de evaluación (Agosto 2011 a Julio 2012) se registró la temperatura y humedad relativa en un punto de muestreo en cada sitio, con un registrador automático (HOBO® PRO SERIES®) colocado a 30 cm de la superficie del suelo. A partir de los datos ambientales se obtuvo la fluctuación en el contenido de humedad del suelo, temperatura y humedad relativa en cada sitio a lo largo del periodo de evaluación.

Análisis estadístico de los datos

Los datos de biomasa de raíces nuevas (prueba de crecimiento potencial de raíz), TRC en altura y diámetro del tallo, estado fenológico y longitud del brote terminal (sitios de plantación) se analizaron estadísticamente para evaluar los efectos de la fertilización, del daño por heladas y del tamaño de la planta, con un modelo estadístico acorde al diseño experimental en cada caso (SAS Institute, 2002). Debido a que la estructura de los tratamientos en las pruebas de vivero y de campo no corresponde a un diseño factorial regular, en los análisis de varianza se utilizaron pruebas de contrastes para evaluar la significancia de los factores de interés.

El efecto de los diferentes factores en estudio sobre la dinámica de la supervivencia de las plantas en la prueba de tolerancia a la deshidratación de la raíz, (efecto de fertilización, daño por heladas, y tamaño de planta) y en los ensayos de campo (efecto de sitio de plantación, fertilización, daño por heladas y tamaño de planta) se analizó mediante regresión lineal generalizada, con un error binomial y el vínculo de ligamiento Cloglog del procedimiento GENMOD (SAS Institute, 2002), para ajustar la curva de supervivencia por parcela al modelo LOG-LOG (Agresti,2002):

$$y = 1 - \exp[-\exp^{(a+b*d)}]$$

Donde: y = supervivencia (%); d = número de días; e = base del logaritmo natural; a y b = parámetros del modelo a estimar. El parámetro a representa el valor del intercepto en el eje Y, y el parámetro b el valor de la pendiente de la curva en función del tiempo. Con los valores estimados de estos parámetros para cada nivel de los diferentes factores analizados se construyeron las curvas ajustadas de la supervivencia de las plantas. Para un mejor ajuste del modelo sobre las curvas de supervivencia, éstas se realizaron con análisis parciales correspondientes a cada uno de los factores en estudio en cada sitio.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Crecimiento potencial de raíz

No se encontró un efecto significativo ($p \leq 0.05$) de la dosis de fertilización, el daño por heladas o la categoría diamétrica en la biomasa de raíces nuevas de las plantas (Cuadro 2.1); sólo la biomasa de las raíces viejas y la biomasa total se modificaron por la categoría diamétrica (Cuadro 2.1), resultado esperado ya que es común que el tamaño de las plantas influya en la biomasa del sistema radical.

Cuadro 2.1. Significancia estadística (p) del efecto de la fertilización, daño por heladas y categoría diamétrica en la biomasa de raíces (nuevas, viejas y totales) de plantas de *Abies religiosa* en la prueba de crecimiento potencial de raíz.

| Factor | Raíces nuevas | Raíces viejas | Raíces totales |
|----------------------|---------------|---------------|----------------|
| Fertilización (F) | 0.4870 | 0.3544 | 0.3872 |
| Daño por heladas (D) | 0.4705 | 0.3422 | 0.3473 |
| F X D | 0.4381 | 0.5575 | 0.7166 |
| Categoría diamétrica | 0.7704 | 0.0091 | 0.0148 |

Los resultados de la prueba de crecimiento potencial de raíz muestran que las plantas de *Abies religiosa* producidas en todos los tratamientos de fertilización produjeron una cantidad abundante de raíces nuevas (Figura 2.1), sin diferencias entre tratamientos, daño por heladas o categoría diamétrica en los valores promedio de biomasa de raíces nuevas (Cuadro 2.2). Estos resultados son importantes, pues muestran que a pesar de las diferencias en el crecimiento y tamaño de las plantas por efecto de la dosis de fertilización, daño por heladas y categoría diamétrica descritas en el capítulo anterior todas ellas tienen

una capacidad potencial similar para desarrollar nuevas raíces en condiciones ambientales favorables como las utilizadas en la prueba de crecimiento potencial de raíz. Lo anterior muestra que, al parecer, las plantas de *A. religiosa* no dependen del nivel de fertilización para generar nuevas raíces o alargar las ya existentes, ya que para ello es suficiente que existan condiciones adecuadas de humedad y temperatura en el suelo. Este resultado también nos indica la capacidad de recuperación que pueden tener los rodales de oyamel, a pesar de los efectos por bajas temperaturas que pudieran surgir como resultado de la alteración del clima.

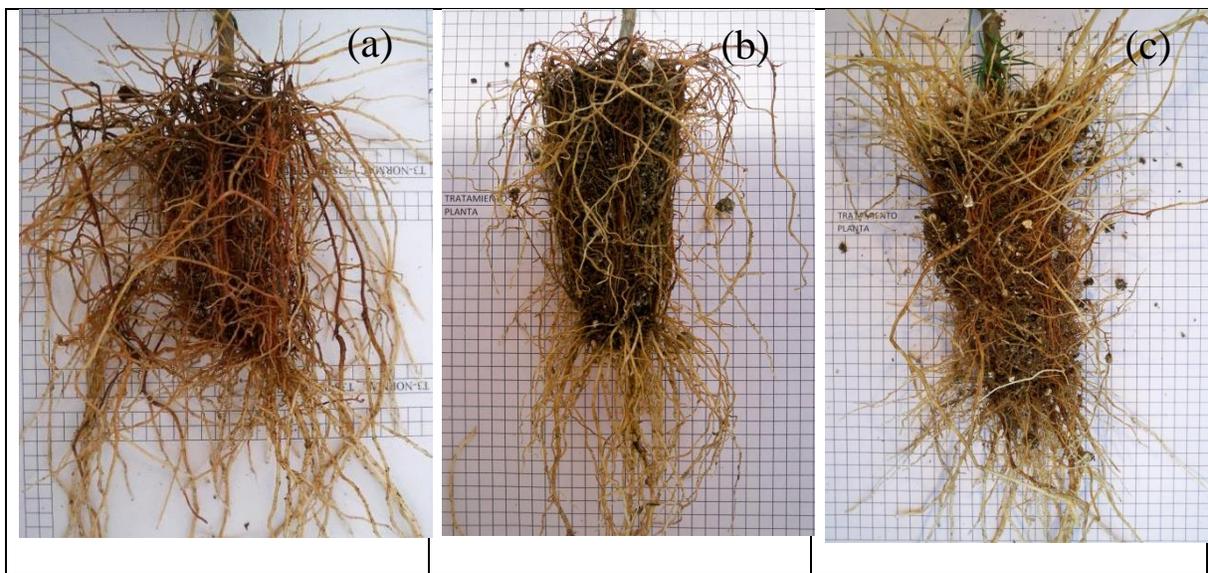


Figura 2.1. Crecimiento de la raíz en plantas de *Abies religiosa* de los tratamientos T-50 (a), TBase (b) y T+50 (c) al finalizar el periodo de evaluación de la prueba de crecimiento potencial de raíz.

Cuadro 2.2. Valores promedio por tratamiento de fertilización, daño del brote y categoría diamétrica de la biomasa seca de raíces en *Abies religiosa* en la prueba de crecimiento potencial de raíz.

| Factor y Nivel | Biomasa seca (g) | | |
|------------------------------|----------------------|---------------|----------------|
| | Raíces nuevas | Raíces viejas | Raíces totales |
| <u>Fertilización:</u> | | | |
| T ₋₅₀ | 0.604 a [‡] | 1.651 a | 2.256 a |
| T _{Base} | 0.643 a | 1.552 a | 2.195 a |
| T ₊₅₀ | 0.564 a | 1.442 a | 2.006 a |
| T ₊₁₀₀ | 0.554 a | 1.408 a | 1.963 a |
| <u>Daño por heladas:</u> | | | |
| Sano | 0.608 a | 1.563 a | 2.171 a |
| Dañado | 0.575 a | 1.463 a | 2.038 a |
| <u>Categoría diamétrica:</u> | | | |
| D ₁ | 0.711 a | 1.588 b | 2.299 b |
| D ₂ | 0.690 a | 2.637 a | 3.328 a |

[‡]Valores promedio en una misma columna y factor seguidos de la misma letra no son diferentes con $p = 0.05$.

Grossnickle (2005), señala que el crecimiento de las raíces se reduce sólo cuando las plantas se exponen a suelos con bajo contenido de humedad; esto ocurre porque el crecimiento de la raíz se ve reducido directamente por el déficit de agua a través de su efecto en la turgencia y la división celular (Hsaio, 1973). El efecto es mayor cuando las plantas se establecen en suelos secos, por el efecto del estrés de trasplante. Las plantas en condiciones de estrés hídrico son incapaces de desarrollar nuevas raíces necesarias para adquirir suficiente agua del suelo para aliviar la escasez de agua y reanudar el crecimiento (Grossnickle, 2005). Al igual que la humedad, la temperatura del suelo puede tener un efecto acumulativo en el crecimiento de plantas de coníferas (Margolis y Brand, 1990). El crecimiento de la raíz se reduce por las bajas temperaturas del suelo (Sutton, 1990; Simpson y Ritchie, 1997; Landhausser *et al.*, 2012). Sin embargo, ninguna de estas condiciones (estrés hídrico o bajas temperaturas) se presentó durante la realización de la prueba, por lo que la prueba de crecimiento potencial de raíz no fue útil para identificar diferencias en la calidad de las plantas asociadas a los tratamientos de fertilización, al daño por heladas en el brote terminal o al tamaño de las plantas.

El crecimiento de las raíces tiene un efecto importante en la supervivencia de las plantas; Tinus (1996), encontró que los brinzales de *Pseudotsuga menziesii* var. *glauca* con un mayor número de raíces nuevas tienen mayor supervivencia. Si los brinzales no presentan un crecimiento radical suficiente después de la plantación, se exponen a condiciones de estrés al no tener superficie de contacto suficiente de la raíz con micro-poros del suelo ocupados por humedad, limitando el acceso al agua del suelo, lo cual puede conducir a la muerte o a una tasa de crecimiento limitado (Grossnickle, 2000). Alternativamente, las plantas que presentan un crecimiento radical suficiente desarrollan un estado hídrico

favorable que fomenta el ciclo de crecimiento de las raíces con el apoyo de la fotosíntesis y la fotosíntesis apoyada por el crecimiento de raíces (Burdett, 1990). Por esta razón la supervivencia de las plantas aumenta cuando existe un crecimiento adecuado de raíces (Margolis y Brand, 1990; Grossnickle, 2005).

Tolerancia a la deshidratación de la raíz

Todos los factores evaluados tuvieron un efecto significativo en la dinámica de la curva de supervivencia de las plántulas de *Abies religiosa* después del estrés por deshidratación (Cuadro 2.3). El modelo base representa la curva de supervivencia de las plantas en el tratamiento T_{Base} , sin daño por heladas y categoría diamétrica D_1 ; los otros parámetros muestran el efecto aditivo del nivel de fertilización (T_{-50} , T_{+50} y T_{+100}), el daño por heladas (dh) y la categoría diamétrica (D_2), que influyeron en la supervivencia de las plantas. Los valores positivos o negativos de cada uno de los parámetros nos indican el efecto específico para aumentar o disminuir la tasa de supervivencia con respecto al modelo base (Cuadro 2.3). Por ejemplo, en la Figura 2.2 se observa que las plantas en el tratamiento T_{+50} alcanzaron la menor supervivencia post-estrés con un 3 %; las plantas en los tratamientos T_{-50} y T_{+100} presentaron la mayor supervivencia en el mismo periodo, con valores máximos de 28 y 19.6 %, respectivamente; esto implica que las plantas en estos tratamientos presentaron una mayor tolerancia al efecto de la deshidratación de la raíz, con diferencias significativas en T_{+100} con respecto a T_{Base} (Cuadro 2.3).

Cuadro 2.3. Significancia (p) de los parámetros estimados en el modelo Log-Log ajustado a la curva de supervivencia de plantas de *Abies religiosa* en la prueba de tolerancia a la deshidratación de la raíz.

| Parámetro | Significado | Estimado | P |
|-------------------|---|-----------------|----------|
| Intercepto | Modelo base($T_{Base} + \text{brote sano} + D_1$) | 1.2970 | <.0001 |
| b_{base} | Tasa máxima de supervivencia, modelo base | -0.1014 | <.0001 |
| b_{+100} | Tasa máxima de supervivencia, efecto de T_{+100} | 0.0160 | 0.0029 |
| b_{+50} | Tasa máxima de supervivencia, efecto de T_{+50} | -0.0438 | <.0001 |
| b_{-50} | Tasa máxima de supervivencia, efecto de T_{-50} | 0.0028 | <.0001 |
| b_{dh} | Tasa máxima de supervivencia, efecto de heladas | 0.0140 | <.0001 |
| b_{D2} | Tasa máxima de supervivencia, efecto de diámetro | 0.0455 | <.0001 |

La mayor tolerancia a la deshidratación de la raíz en las plantas de los tratamientos T_{-50} y T_{+100} puede estar relacionada con el mayor equilibrio en la asignación de recursos en estas plantas, representado por los mayores valores del índice de calidad de Dickson (ICD) registrado en estos tratamientos (Capítulo 1, Cuadro 1.4.), más que por el crecimiento o biomasa de la raíz; un equilibrio en la asignación de recursos a los diferentes componentes de la planta asegura el abasto de agua y nutrientes para satisfacer las demandas de la parte aérea de la planta (Burdett, 1990).

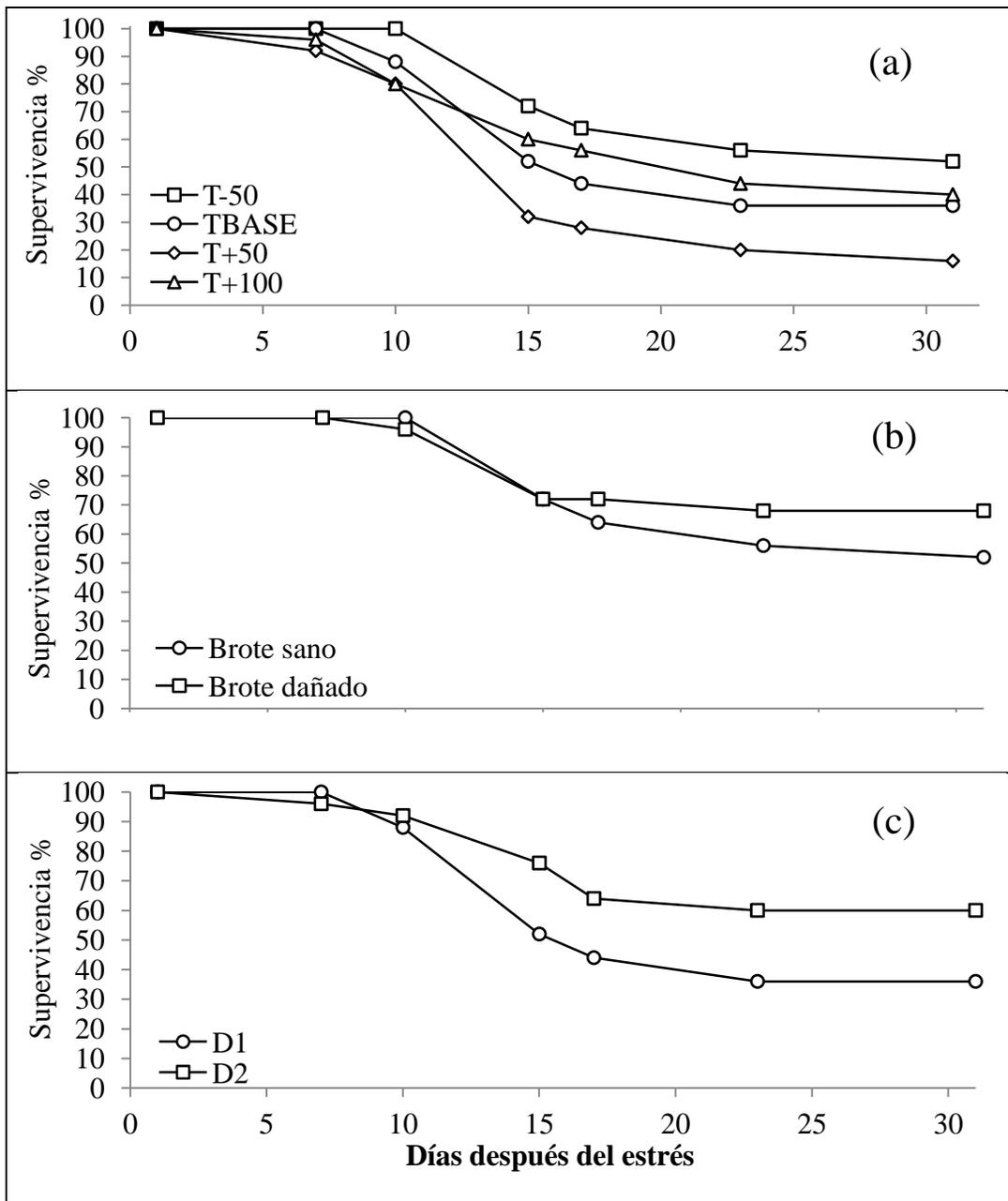


Figura 2.2. Efecto del tratamiento de (a) fertilización, (b) daño por heladas y (c) tamaño de la planta en la dinámica de la curva de supervivencia de plantas de *Abies religiosa* después de exponer la raíz a una deshidratación.

El daño por heladas en el brote terminal también tuvo un efecto positivo en la tolerancia de las plantas a la deshidratación de la raíz, al aumentar la supervivencia post-estrés en más de 12 % con respecto a las plantas no dañadas (Figura 2.2b). En este caso, la mayor supervivencia en plantas dañadas por heladas, se asocia con el hecho de que estas plantas desarrollaron una mejor relación raíz/parte aérea (Capítulo 1, Cuadro 1.4). Al parecer, el daño por heladas en el brote terminal ocasionó una mayor asignación de energía al crecimiento en biomasa subterránea, similar al efecto que describe Marschner (1995), en espera de una oportunidad de crecer cuando las condiciones ambientales lo permitan y acumular una reserva de nutrimentos para el crecimiento posterior.

En *Pinus banksiana* las plantas cultivadas con un nivel bajo en N presentaron mayor tolerancia a la sequía que las de plántulas con mayor nivel de N (Tan y Hogan, 1997), al igual que en el caso de *Pinus taeda* (Pharis y Kramer, 1964), lo que coincide con el presente trabajo, en donde las plantas del tratamiento T_{.50} presentaron mayor supervivencia en la prueba de tolerancia a la deshidratación (Figura 2.2a). Las raíces de las plantas deben extenderse rápidamente a través del perfil del suelo para extraer el agua (Jacobs *et al.*, 2004); sin embargo y de acuerdo a lo encontrado por Tan y Hogan, (1997) en *Pinus banksiana*, la fertilización nitrogenada en dosis elevadas reduce la penetración de la raíz primaria, lo que puede aumentar la susceptibilidad a la sequía.

El mayor diámetro del tallo también tuvo un efecto positivo en la tolerancia de las plantas a la deshidratación de la raíz, al aumentar la tasa de supervivencia en más de 11 % con respecto a las plantas de categoría D₁ (Figura 2.2c). En este caso, las diferencias se pueden asociar a la mayor biomasa de raíz y una mejor relación raíz/parte aérea en las plantas de mayor tamaño en comparación con las plantas de la categoría D₁. En estudios con otras especies de coníferas se ha encontrado que las plantas con un mayor volumen

inicial de raíz tienden a tolerar mejor el shock de trasplante (Haase y Rose, 1993), y puede haber tasas más rápidas de crecimiento temprano en comparación con plantas con un menor volumen de raíz (Rose *et al.*, 1991; 1997).

Las plantas de mayor tamaño podrían estar en desventaja al momento de la plantación si las diferencias en tamaño se asocian a una mayor área foliar, ya que podría aumentar la demanda de agua por transpiración; por ejemplo, Jacobs *et al.*, (2009) en un estudio para investigar la recuperación de la raíz de *Quercus rubra* después de un estrés por sequía simulada, encontraron que las plantas con mayor volumen de raíz eran menos capaces de mitigar el estrés por sequía que aquellas de menor tamaño. Esto resalta la importancia del equilibrio del sistema radical y de la parte aérea en relación con las características del sitio de plantación (Davis y Jacobs, 2005). En el presente trabajo las plantas de mayor tamaño y con mayor volumen radical fueron las que presentaron un mayor balance entre la raíz y la parte aérea (con menor altura y menor PAR y IE), y un mayor valor en el ICD (Capítulo 1, Cuadro 1.4).

Supervivencia de las plantas en los sitios de plantación

Un año después de la plantación, la mortalidad de plantas en S₂, el sitio de mayor elevación, fue 84% mayor que en S₁ (Figura 2.3). En S₂ la mortalidad de las plantas inició después de los 60 días de la plantación, coincidiendo con el descenso de humedad del suelo y de temperatura, y se mantuvo hasta el mes de febrero como el periodo de mayor mortalidad (60 - 180 días después de plantación). El monitoreo de la humedad del suelo, humedad relativa y temperatura del aire en los dos sitios de plantación muestra que durante el periodo de evaluación se presentaron condiciones ambientales contrastantes en los dos sitios (Figura 2.4). En S₂ se presentó una humedad del suelo y humedad relativa menor que

en S₁ durante todo el año de evaluación, generando una condición de mayor estrés hídrico, especialmente en los periodos de octubre a diciembre y de marzo a mayo (Figura 2.4a); además, en S₂ se presentó una mayor fluctuación en las temperaturas diurnas, con temperaturas máximas y mínimas más extremas que en S₁ (Figura 2.4b); aunque en ambos sitios se presentó casi el mismo número de días con heladas durante el invierno, en S₂ la temperaturas mínimas extremas fueron 2-3 °C menor que en S₁. Lo anterior muestra la importancia de las condiciones ambientales del sitio de plantación para el establecimiento y supervivencia de las plantas de *A. religiosa*

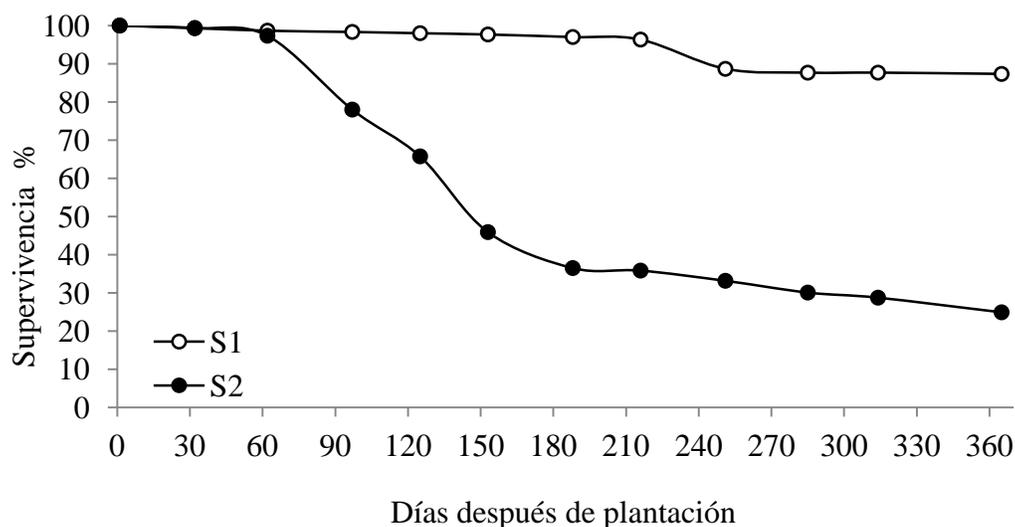


Figura 2.3. Efecto del sitio de plantación en la dinámica de la curva de supervivencia de plantas de *Abies religiosa*.

Todos los factores evaluados tuvieron un efecto significativo en la supervivencia de las plantas de *Abies religiosa* en los dos sitios de plantación (Cuadro 2.4). En cada caso, el modelo base representa la curva de supervivencia de las plantas en el tratamiento de fertilización T_{Base}, sin daño por heladas y en la categoría diamétrica D₁; los otros parámetros muestran los efectos aditivos del nivel de fertilización (T₋₅₀, T₊₅₀ y T₊₁₀₀), del daño por heladas (brote dañado) o de la categoría diamétrica D₂. Los valores negativos o

positivos de cada uno de los parámetros nos indican su efecto específico para disminuir o aumentar los valores en cada uno de los modelo base, y de esta forma modificar la curva de supervivencia. Con excepción del daño por heladas, que afectó de manera similar la dinámica de la curva de supervivencia de las plantas en los dos sitios, el efecto de la dosis de fertilización y la categoría diamétrica fue diferente de un sitio a otro (Cuadro 2.4).

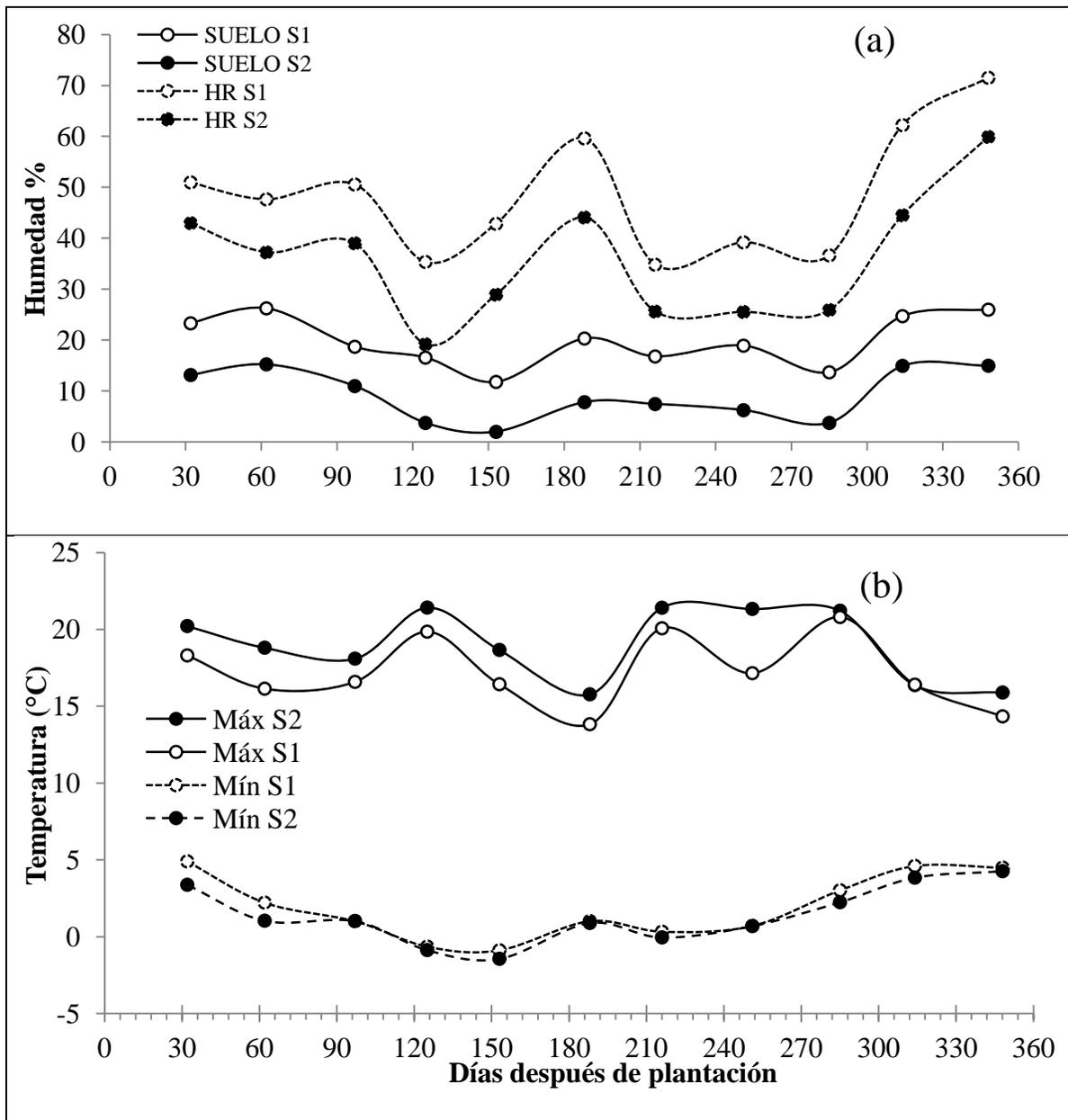


Figura 2.4. Valores promedio del contenido de: (a) humedad en el suelo y humedad relativa mínima diaria, y (b) temperatura mínima y máxima diaria a lo largo del periodo de

estudio en los dos sitios de plantación (S_1 y S_2). Los datos de humedad relativa y temperatura representan el promedio diario del periodo previo a la fecha de medición.

Cuadro 2.4. Significancia (p) de los parámetros estimados para cada sitio (S_1 y S_2) en el modelo Log-Log ajustado a la curva de supervivencia de plantas de *Abies religiosa*.

| Parámetro | Significado | S_1 | | S_2 | |
|---------------------------------------|---|----------|-------|----------|-------|
| | | Estimado | p | Estimado | p |
| <u>Tratamientos de fertilización:</u> | | | | | |
| Intercepto | Modelo base(T_{BASE}) | 1.5134 | <.001 | 1.8053 | <.001 |
| b_{base} | Tasa máxima de supervivencia, modelo base | -0.0009 | 0.026 | -0.0209 | <.001 |
| b_{+100} | Tasa máxima supervivencia, efecto de T+100 | - | - | -0.0003 | 0.352 |
| b_{+50} | Tasa máxima supervivencia, efecto de T+50 | -0.0011 | 0.004 | 0.0019 | <.001 |
| b_{-50} | Tasa máxima supervivencia, efecto de T-50 | -0.0007 | 0.074 | -0.0003 | 0.406 |
| <u>Daño por heladas en el brote:</u> | | | | | |
| Intercepto | Modelo base (sin daño por heladas) | 1.3269 | <.001 | 1.7190 | <.001 |
| b_{base} | Tasa máxima de supervivencia, modelo base | -0.0016 | <.001 | -0.0178 | <.001 |
| b_{dh} | Tasa máxima de supervivencia, efecto heladas | 0.0004 | 0.250 | 0.0019 | <.001 |
| <u>Diámetro:</u> | | | | | |
| Intercepto | Modelo base (categoría D_1) | 1.5835 | <.001 | 2.1012 | <.001 |
| b_{base} | Tasa máxima de supervivencia, modelo base | -0.0005 | 0.280 | -0.0242 | <.001 |
| b_{D2} | Tasa máxima de supervivencia, efecto de D_2 | 0.0001 | 0.765 | -0.0047 | <.001 |

En S_1 las plantas que recibieron la menor dosis de fertilización ($T_{.50}$) presentaron la mayor supervivencia al final del periodo de estudio (Figura 2.5a), mientras que en S_2 fueron las plantas con fertilización con una dosis mayor en 50 y 100 % (Figura 2.5b). En los dos

sitios las plantas con daño por heladas en el brote terminal presentaron mayor supervivencia que las plantas sin daño previo (Figura 2.5c y d), aunque en S_1 las diferencias no fueron significativas. En cuanto al tamaño de la planta, en S_1 no se encontró un efecto significativo de la categoría diamétrica en la tasa de supervivencia (Cuadro 2.4 y Figura 2.5e), mientras que en S_2 las plantas de mayor talla presentaron una mayor tasa de mortalidad (mayor pendiente de la curva) durante el periodo invernal, entre los 90 y 180 días después de la plantación (Figura 2.5f).

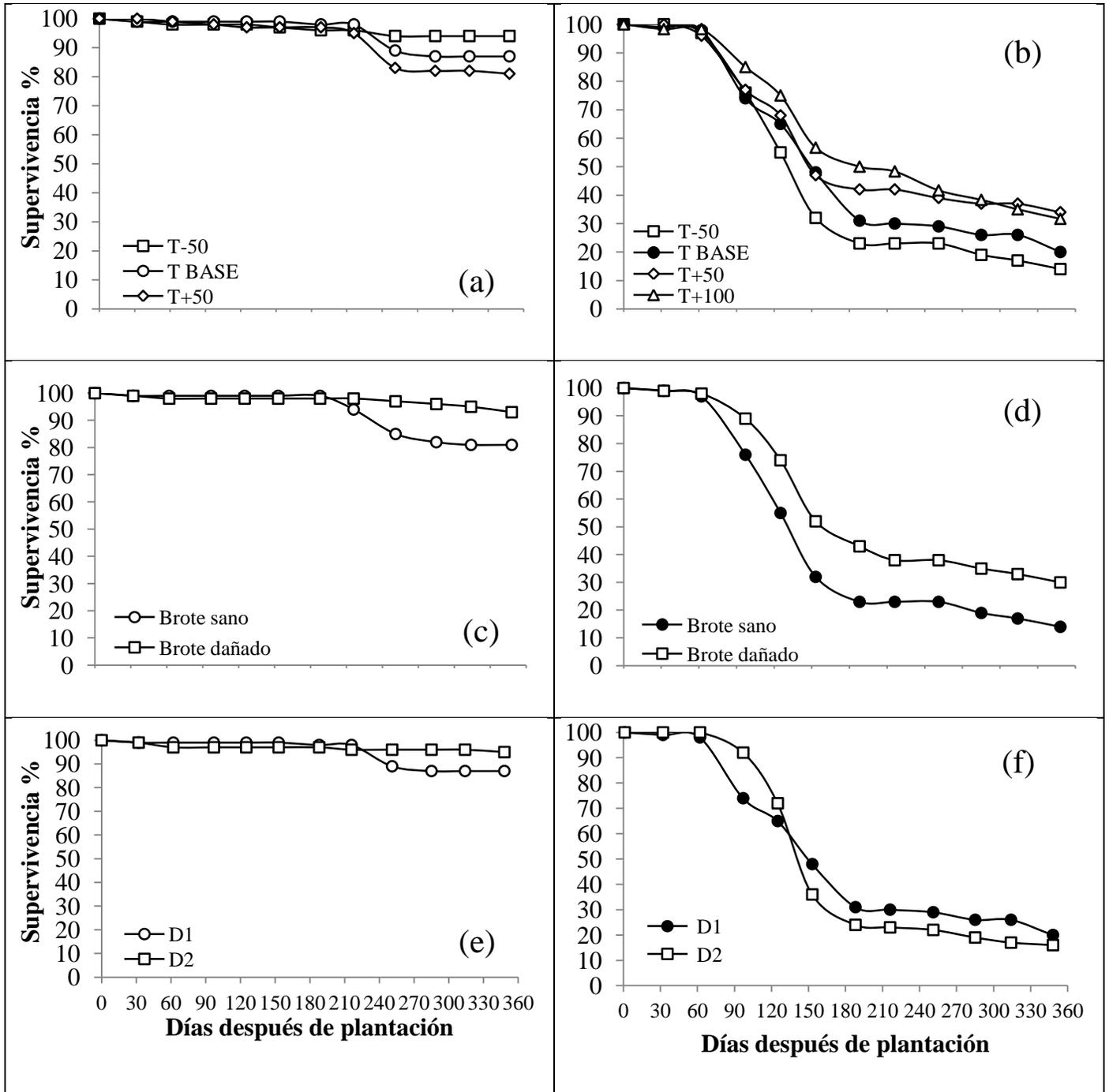


Figura 2.5. Efecto del tratamiento de fertilización (a, b), el estado del brote terminal (c, d) y la categoría diamétrica en tallo (e, f) sobre la curva de supervivencia de las plantas de *Abies religiosa* en los sitios S₁ (a, c y e) y S₂ (b, d y f)

Al parecer, cuando las condiciones ambientales son una limitante para el establecimiento de *Abies religiosa*, el estado nutrimental y un sistema radical abundante es un recurso útil para tolerar estas condiciones, y las dosis elevadas de fertilizantes permiten la recarga y translocación de nutrientes adecuadas para superar las condiciones ambientales adversas, como en el caso del sitio S₂, en donde la supervivencia de las plantas en los tratamientos T₊₅₀ y T₊₁₀₀ al final del periodo de evaluación fue casi el doble de los tratamientos con menor dosis (T_{Base} y T₋₅₀); en cambio, cuando las condiciones ambientales son más favorables y adecuadas para el establecimiento de las plantas, el estado nutrimental ya no representa una ventaja competitiva; en S₁ las plantas con un mejor equilibrio entre la raíz y la parte aérea fueron las que lograron una mayor supervivencia (T₋₅₀ y T₊₁₀₀), al igual que las plantas con el brote dañado y con un mayor tamaño en diámetro. Estos resultados coinciden con los resultados obtenidos en la prueba de tolerancia de la raíz a la deshidratación, en donde de las plantas con una raíz de mayor biomasa fueron las que mejor suportaron el estrés y lograron sobrevivir, esto es clave al momento de realizar la selección del sitio de plantación, ya que con estos resultados podemos determinar el tipo de planta ideal para un determinado patrón de condiciones climáticas. Los resultados de este estudio indican que para fines de reforestación con especies como *Abies*, la producción de planta debe ir coordinada con los sitios a reforestar para la optimización de recursos. Los sitios adversos deben reforestarse con planta sujeta a un mayor nivel de fertilización en vivero.

El efecto del daño previo por heladas en la supervivencia de las plantas se explica por el hecho de que las plantas sin daño en vivero presentaron mayor talla en altura y mayor área foliar expuesta a condiciones de bajas temperaturas y sequía en campo, a diferencia de las plantas pequeñas dañadas por heladas que tuvieron una menor altura, pero un mayor número de ramas y un mayor equilibrio entre la raíz y la parte aérea. De tal forma que este

es un efecto indirecto que afectó la relación biomasa aérea/raíz con las implicaciones fisiológicas ya indicadas.

Un mayor diámetro del tallo y tamaño de planta representó una ventaja en S_2 sólo cuando las condiciones climáticas y edáficas no eran tan adversas (hasta los 120 días después de plantación); cuando las bajas temperaturas se convirtieron en un factor de estrés, el mayor tamaño se convirtió en una desventaja, al mantener una menor supervivencia desde pleno invierno hasta el periodo de sequía (120 a 350 días) en comparación con la categoría D_1 (Figura 2.5f). Estos resultados difieren de los reportados en otros estudios similares con plantas de *Quercus rugosa* (Ramírez y Rodríguez, 2004) y en *Pinus halepensis* (Tsakalidimi *et al.*, 2013) en los que la supervivencia aumentó al utilizar plantas de mayor talla en diámetro. Sin embargo, en esos estudios, el principal factor de estrés en los sitios de plantación fue la sequía y no las bajas temperaturas. No ha habido un análisis de estudios contrastantes en condiciones ambientales, lo que limita la comparación directa de resultados. Para la mayoría de los estudios, las plantas más grandes resultaron en mayor éxito siempre que las condiciones de campo sean favorables (Rose y Ketchum, 2003; Ramírez y Rodríguez, 2004).

La capacidad de las plantas para responder de manera positiva a la fertilización parece depender del factor principal de estrés; en sitios en donde el factor limitante son las temperaturas bajas (S_2) el efecto de la fertilización se evidencia (Figura 2.5b), mientras que en sitios en donde el principal factor de estrés es la disminución de la humedad en el suelo (S_1), la biomasa de raíz o el equilibrio parte aérea radical parece ser un mejor indicador de la supervivencia. A pesar de que algunos estudios previos muestran una correlación entre la fertilización, el desarrollo del sistema radical y la evasión de la sequía (Tan y Hogan, 1997), los resultados del presente estudio muestran que el papel del N como modificador de

la morfología y fisiología de las plantas en relación con la resistencia a la sequía es bastante complejo. En experimentos en condiciones controladas con *Pinus contorta* (Etter, 1969) y *Pinus banksiana* (Tan y Hogan, 1997) se encontró que las plantas con un nivel bajo en N eran más adecuados para tolerar la sequía que aquellas con mayor dosis de N. Del mismo modo, plantas de *Pinus taeda* cultivadas en altos niveles de N fueron más afectadas por la sequía que las crecidas en niveles moderados de N (Pharis y Kramer, 1964). Esta relación también se explica por el mayor desarrollo de los componentes vegetales con mayores niveles de N.

Plantas con dosis de fertilización elevada pueden ser menos capaces de equilibrar los costos de energía asociados con la respiración, con las ganancias de energía de la fotosíntesis, lo que aumenta la dependencia de los carbohidratos almacenados, y aún más en condiciones de sequía, ya que esta condición limita el crecimiento de la planta (Haase y Rose, 1993). Por lo tanto, la fertilización con dosis elevadas podría reducir la tolerancia a la sequía después de la plantación, ya que está documentado que la fertilización reduce el crecimiento y la supervivencia de las plantas en años posteriores en sitios con condiciones de sequía (Jacobs *et al.*, 2004).

Las plantas con dosis elevadas de fertilización distribuyen proporcionalmente más biomasa aérea con respecto a tejidos de la raíz que las no fertilizadas. Relaciones altas de parte aérea: raíz pueden ocasionar problemas en el establecimiento de plantas en sitios de poca humedad, ya que hay una menor superficie de raíz para suministrar el agua requerida por una mayor demanda de transpiración de las hojas (Jacobs *et al.*, 2004).

Crecimiento y fenología de las plantas en los sitios de plantación

Durante el primer año de la plantación se presentaron diferencias estadísticas significativas entre sitios en todas las variables de crecimiento y fenología de la yema terminal evaluadas (Cuadro 2.5). A diferencia del efecto del sitio, la dosis de fertilización solo afectó el crecimiento del brote en el ciclo 2011, la altura final y la TRC en diámetro, mientras que el daño por heladas en el brote terminal solo influyó en la altura final de la planta y en la fenología de la yema terminal, y la categoría diamétrica no afectó ninguna variable de crecimiento de las plantas (Cuadro 2.5).

Cuadro 2.5. Significancia estadística (p) del efecto del sitio y tratamientos (fertilización, estado del brote y categoría diamétrica) sobre el crecimiento de las plantas y fenología de la yema terminal en *Abies religiosa* después de su plantación en campo.

| | Altura | | | TRC [†] | | Fenología |
|---------------------------------------|--------|--------------------------------|--------------------------------|------------------|----------|-----------|
| | Total | C ₂₀₁₁ [‡] | C ₂₀₁₂ [‡] | Altura | Diámetro | yema |
| Sitio | <.001 | 0.011 | <.001 | <.001 | 0.006 | 0.005 |
| Tratamiento: | <.001 | 0.016 | 0.140 | 0.505 | 0.029 | 0.020 |
| T _{Base} vs T ₋₅₀ | 0.120 | 0.193 | 0.934 | 0.797 | 0.075 | 0.170 |
| T _{Base} vs T ₊₅₀ | 0.001 | 0.103 | 0.432 | 0.709 | 0.156 | 0.177 |
| B _{Sano} vs B _{dh} | 0.001 | 0.769 | 0.082 | 0.386 | 0.275 | 0.002 |
| D ₁ vs D ₂ | 0.148 | 0.214 | 0.685 | 0.608 | 0.154 | 0.549 |

[†]TRC = Tasa relativa de crecimiento; [‡]C₂₀₁₁, C₂₀₁₂= Ciclos 2011 y 2012.

Las diferencias entre sitios en el crecimiento de las plantas fueron evidentes, dadas las condiciones ambientales contrastantes en ellos, descritas anteriormente (Figura 2.4); en S₁ las plantas crecieron en promedio casi 12 cm más en altura que en S₂, con una TRC cuatro veces mayor y un inicio más temprano del alargamiento de la yema terminal, aunque en el crecimiento en diámetro las diferencias no fueron tan elevadas (Cuadro 2.6). En coincidencia con otros estudios (Li *et al.*, 2003; Viveros *et al.* 2005; Acevedo *et al.*, 2006), la mayor elevación y la menor temperatura en S₂ retrasaron la brotación y crecimiento de la yema terminal.

Cuadro 2.6. Efecto del sitio, dosis de fertilización, daño por heladas y categoría diamétrica en el crecimiento de las plantas y fenología de la yema terminal en *Abies religiosa* después de su plantación en campo.

| Factor y nivel | Altura (cm) | | | TRC [†] (mm mm ⁻¹ mes ⁻¹) | | Fenología |
|---------------------------------------|----------------------|--------------------------------|--------------------------------|---|----------|-----------|
| | total | C ₂₀₁₁ [‡] | C ₂₀₁₂ [‡] | altura | diámetro | yema |
| <u>Sitios:</u> | | | | | | |
| S ₁ | 44.43 a [¶] | 0.98 a | 14.48 a | 0.036 a | 0.025 a | 1.80 a |
| S ₂ | 32.95 b | 0.61 b | 2.80 b | 0.008 b | 0.020 b | 1.14 b |
| <u>Tratamientos de fertilización:</u> | | | | | | |
| T _{.50} | 38.92 b | 0.36 b | 10.52 a | 0.027 a | 0.021 b | 1.26 a |
| T _{Base} | 40.20 b | 0.73 ab | 9.60 a | 0.024 a | 0.025 ab | 1.51 a |
| T ₊₅₀ | 45.80 a | 1.28 a | 10.70 a | 0.025 a | 0.028 a | 1.26 a |
| T ₊₁₀₀ | 39.32 b | 1.27 a | 10.75 a | 0.030 a | 0.025 ab | 1.55 a |
| <u>Daño por heladas:</u> | | | | | | |
| Sin daño | 38.92 a | 0.36 a | 10.52 a | 0.027 a | 0.021 a | 1.26 b |
| Con daño | 30.39 b | 0.29 a | 6.42 a | 0.020 a | 0.022 a | 1.85 a |
| <u>Tamaño de planta:</u> | | | | | | |
| D ₁ | 40.20 a | 0.73 a | 9.61 a | 0.024 a | 0.025 a | 1.51 a |
| D ₂ | 42.02 a | 1.02 a | 8.47 a | 0.020 a | 0.020 a | 1.40 a |

[†]TRC = Tasa relativa de crecimiento; [‡]C₂₀₁₁, C₂₀₁₂= Ciclos 2011 y 2012; [¶]Valores promedio en una misma columna y factor seguidos de la misma letra no son significativamente diferentes (p=0.05).

La fertilización tuvo un efecto positivo sobre el crecimiento de la planta, especialmente en el ciclo 2011 y en la TRC en diámetro, lo que podría representar una ventaja competitiva en el crecimiento de *Abies religiosa* (Cuadro 2.6); sin embargo, la respuesta no fue lineal, pues las mayores diferencias se encuentran entre los tratamientos T₊₅₀ y T₋₅₀ (Cuadro 2.6), por lo que no es necesario ni conveniente duplicar la dosis de fertilización para aumentar la tasa de crecimiento de las plantas en esta especie. Los efectos de la fertilización son similares a los encontrados en *Picea sitchensis* (Townend, 1995) al aplicar fertilizante de liberación lenta y mejorar el crecimiento en plantas fertilizadas en comparación con las plantas no fertilizadas, o en plantas de *Pseudotsuga menziesii* (Rose y Ketchum, 2003) y de *Abies fraseri* y *Pinus resinosa* (Wilson *et al.*, 2012) al obtener valores superiores en diámetro y altura al incrementar la dosis de fertilización.

Un aspecto interesante es que la sobre-fertilización no modificó la fenología de la yema terminal, ya que de acuerdo con estudios en otras especies de coníferas (Li *et al.*, 2003; Viveros y Vargas, 2007), la fertilización puede alargar la estación de crecimiento y adelantar la brotación de la yema terminal en la primavera, lo cual podría tener efectos negativos en la supervivencia de las plantas. Acevedo *et al.* (2006) encontraron que la aplicación de una dosis alta de nitrógeno en plantas de vivero aceleró el rompimiento de la yema y retrasó su formación, por lo que se alargó el periodo de crecimiento del brote terminal, lo que puede tener repercusiones en la aclimatación de las plantas a las condiciones ambientales del sitio. Sin embargo, el inicio del crecimiento de la yema terminal (interrupción de la dormancia) también depende de factores ambientales (Turner y Mitchell, 2003), y de la condición interna del ápice terminal (Viveros y Vargas, 2007). En este estudio ninguno de los tratamientos modificó de forma significativa la fenología de la yema (Cuadro 2.6), por lo que al parecer en *Abies religiosa* existe un control muy fuerte de

estos eventos fenológicos en la yema terminal o el efecto de la fertilización fue anulado por un efecto mayor de las condiciones climáticas de los sitios de plantación sobre la fenología. En el estudio realizado por Bigras *et al.*, (1996) en *Picea mariana* tampoco se encontró un efecto de la fertilización en vivero en la brotación de la yema terminal en plantas en el siguiente ciclo de crecimiento.

Las plantas dañadas por heladas en el vivero presentaron una menor altura final, a pesar de que adelantaron el alargamiento del brote terminal con respecto a las plantas sin daño previo (Cuadro 2.6); el menor tamaño y el inició más rápido de la brotación de la yema en estas plantas es consistente con el daño previo ocurrido en vivero por heladas tempranas, ya que al adelantar el periodo de crecimiento están más expuestas a temperaturas mínimas extremas y el daño al brote terminal durante la etapa de vivero ocasionó un menor crecimiento en altura (Capítulo 1, Cuadro 1.5). Los resultados de este trabajo muestran la capacidad de recuperación de *Abies religiosa* ante daños por temperaturas o por sequía, indicando que estos rodales pueden ser más resistente y resilientes de lo que se ha pensado. Aún con desventajas en fertilización y daño por sequía la variación de componentes vegetales y sus proporciones se ve poco afectada después de dos años de evaluación.

A diferencia de los otros factores, la categoría diamétrica no influyó de manera significativa en el crecimiento de las plantas ni en la fenología de la yema terminal (Cuadro 2.6). Estos resultados son similares a lo reportado por Ramírez y Rodríguez (2004), quienes tampoco encontraron diferencias en la tasa de crecimiento en diámetro y altura en plantas de *Quercus rugosa* de diferentes categorías diamétricas (<2 y 2-4 mm) pero difieren de los resultados encontrados en *Pseudotsuga menziesii* (Rose y Ketchum, 2003), *Larix olgensis* (Li *et al.*, 2011) y *Pinus halepensis* (Tsakaldimi *et al.*, 2013), especies en las que el

diámetro inicial de la planta si influyó de manera significativa en el crecimiento posterior en campo.

CONCLUSIONES

El desempeño en campo (crecimiento y supervivencia) de las plantas de *Abies religiosa* fue afectado por los tratamientos de fertilización, el estado del brote y el tamaño de las plantas; sin embargo las condiciones del sitio de plantación fueron mucho más importantes y modificaron en gran medida el efecto de los otros factores, por lo que la selección de las plantas con las condiciones fisiológicas y morfológicas idóneas para cada ambiente de plantación debe ir acompañada de una selección cuidadosa de los sitios de plantación que reúnan las condiciones mínimas del nicho ecológico de la especie.

CAPITULO 3. CONCLUSIONES GENERALES

Las variables morfológicas altura y diámetro de *Abies religiosa* en vivero lograron modificarse en repuesta de los tratamientos de fertilización, resultado de alteración en la asignación de biomasa a la raíz y la biomasa total, además de estas modificaciones, la concentración de Nitrógeno, Fosforo y Potasio en los componentes vegetales de raíz, tallo y follaje presentaron cambios significativos. Estos resultados tienen implicaciones importantes para el uso de la fertilización como una actividad de manejo en la producción de plantas en vivero y debido a su efecto en el desempeño posterior de las plantas en campo.

El daño por helada en el brote terminal en vivero también logro modificar el crecimiento, la asignación de biomasa y la concentración de nutrientes en los componentes vegetales de las plantas. Las plantas dañadas resultaron de menor tamaño en altura pero con mayor diámetro, características que se relacionan de manera positiva con el establecimiento de las plantas bajo condiciones de estrés hídrico y térmico en el sitio de plantación; también presentaron una mayor concentración nutrimental en raíz y tallo, lo que podría constituir una reserva nutrimental importante para su desempeño y supervivencia si se plantan en suelos de baja fertilidad.

El desempeño en campo (crecimiento y supervivencia) de las plantas de *Abies religiosa* fue afectado por los tratamientos de fertilización, el estado del brote y el tamaño de las plantas; sin embargo las condiciones del sitio de plantación son mucho más importantes y modificaron en gran medida el efecto de los otros factores, por lo que la selección de las plantas con las condiciones fisiológicas y morfológicas idóneas para cada ambiente de plantación debe ir acompañada de una selección cuidadosa de los sitios de plantación que reúnan las condiciones mínimas del nicho ecológico de la especie.

Este estudio demuestra que la forma de producción de planta debe estar en concordancia con los sitios a reforestar. En general cuanto más adversos sean los sitios a reforestar con *Abies religiosa*, menos dosis de fertilización. En ese mismo sentido, la relación raíz parte aérea debe disminuir con la adversidad del sitio a reforestar.

LITERATURA CITADA

- Acevedo R., R., J. J. Vargas H., J. López U. y J. Velázquez M. 2006. Efecto de la procedencia geográfica y de la fertilización en la fenología del brote terminal en plántulas de *Pseudotsuga* sp. *Agrociencia* 40: 125-137
- Aerts R. and O. Honnay .2011. Forest restoration, biodiversity and ecosystem functioning. *BMC Ecol* 11–29. DOI:10.1186/1472-6785-11-29
- Agresti, A. 2002. Categorical data analysis. Wiley-Interscience, New York . 710 p.
- Alvarado R., D., L. I. de Bauer, and A. J. Galindo. 1993. Decline of sacred fir (*Abies religiosa*) in a forest park south of Mexico City. *Environmental Pollution* 80:115-121.
- Allan, J. E. 1971. The preparation of agricultural samples for analysis by atomic absorption spectroscopy. Varian Techtron, Walnut Creek, California. 15 p.
- Alvarado-Rosales, D., and T. Hernández-Tejeda. 2002. Decline of sacred fir in the Desierto de los Leones National Park. *In: Urban Air Pollution and Forests: Resources at Risk in the Mexico City Air Basin*. Fenn, M., L. I. de Bauer, and T. Hernández-Tejeda (eds). Ecological Studies Series, Vol. 156. Springer-Verlag, N.Y. pp: 243- 260.
- Ángeles-Cervantes E. y L. López-Mata. 2009. Supervivencia de una cohorte de plántulas de *Abies religiosa* bajo diferentes condiciones post-incendio. *Bol.Soc.Bot.Méx.* 84: 25-33
- Aronsson, A. 1980. Frost hardiness in Scots pine (*Pinus silvestris* L.) II. Hardiness during winter and spring in young trees of different mineral nutrient status. Studia Forestalia Suecica No. 155. 27 p.
- Blanco-Garcia, A., C. Saenz-Romero, C. Martorell, and P. Alvarado-Sosa. 2011. Nurse-plant and mulching effects on three conifer species in a Mexican temperate forest. *Ecological Engineering* 37:994-998.

- Benzian, B., R. M. Brown, and C. R. Freeman. 1974. Effect of late-season top-dressings of N (and K) applied to conifer transplants in the nursery on their survival and growth on British forest sites. *Forestry* 47:153-184.
- Bigras, F.J., A. Gonzales, A.L D'Aoust, and C. Hébert. 1996. Frost hardiness, bud phenology, and growth of containerized *Picea mariana* seedlings grown at three nitrogen levels and three temperature regimes. *New For.*12: 243–259.
- Birchler ,T., R. Rose, A. Royo, y M. Pardos. 1998. La planta ideal: revisión del concepto, parámetros definitorios e implementación práctica. *Invest. Agr. Sist. Recur. For.* 7:109–121
- Bremner, J. M. 1965. Total nitrogen. *In: Methods of Soil Analysis (Part 2)*. Black C. A. (Ed.). American Society of Agronomy. Madison, Wisconsin.US. pp: 1149-1178.
- Burdett, A. N. 1990. Physiological processes in plantation establishment and the development of specifications for forest planting stock. *Can. J. For. Res.* 20:415–427
- Chirino, E., A. Vilagrosa, E. I. Hernández, A. Matoc and V.R. Vallejo. 2008. Effects of deep container on morphofunctional characteristics and root colonization in *Quercus suber* L. seedlings for reforestation in Mediterranean climate. *For. Ecol. Manag.* 256:779–785
- Ciccarese, L., A. Mattsson and D. Pettenella. 2012. Ecosystem services from forest restoration: thinking ahead. *New Forests*. DOI 10.1007/s11056-012-9350-8
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). 2010. Evaluación Externa de los Apoyos de Reforestación 2009. Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco, Edo. De México. 140 p.

- 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. *For. Ecol. Manag.* 260:71–78
- Davies, W. J., and J. Zhang. 1991. Root signals and the regulation of growth and development of plants in drying soils. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology* 42:55-76.
- Davis, A.D. and D.F. Jacobs. 2005. Quantifying root system quality of nursery seedlings and relationship to outplanting performance. *New For.* 30:295–311
- Dey, D.C. and W.C. Parker. 1997. Morphological indicators of stock quality and field performance of red oak (*Quercus rubra* L.) seedlings underplanted in a central Ontario shelterwood. *New Forest* 14:145–156
- Duryea, M. L. 1984. Nursery cultural practices: impacts on seedling quality. *In: Forest Nursery Manual: Production of Bareroot Seedlings.* Duryea, M. L. and T. D. Landis (Eds). Martinus Nijhoff/Dr. W. Junk Publishers, pp: 143–164.
- Duryea, M.L. and P.M. Dougherty (eds). 1991. *Forest regeneration manual.* Kluwer academic publishers, Dordrecht, The Netherlands. 433 p
- Endara, A. A., S. Franco M., G. Nava B., J. I. Valdez H. and T.S Fredericksen. 2012. Effect of human disturbance on the structure and regeneration of forests in the Nevado de Toluca National Park, Mexico. *Journal of Forestry Research* 23: 39–44.
- Etter, H.M.1969. Growth, metabolic components and drought survival of lodgepole pine seedlings at three nitrate levels, *Can. J. Plant. Sci.* 49: 393–402.

- Folk, R. S. and S. Grossnickle 2000. Stock-type patterns of phosphorus uptake, retranslocation, net photosynthesis and morphological development in interior spruce seedlings. *New For* 19: 27–49
- Gomez, A., R. F. Powers, M. J. Singer, and W. R. Horwath. 2002. Soil compaction effects on growth of young ponderosa pine following litter removal in California's Sierra Nevada. *Soil Science Society of America Journal* 66: 1334-1343.
- Gray, A. N. and Spies T. A. 1996. Gap size, within-gap position and canopy structure effects on conifer seedling establishment. *Journal of ecology*. 84: 635-645
- Green, T.H. and R.J. Mitchell. 1992. Effects of nitrogen on the response of loblolly pine to water stress. *Photosynthesis and stomatal conductance*. *New Phytol.* 122: 627–633
- Grossnickle, S. C. 2000. *Ecophysiology of northern spruce species: the performance of planted seedlings*. NRC Research Press, Ottawa. 407 p.
- Grossnickle, S. C. 2005. Importance of root growth in overcoming planting stress. *New Forests* 30: 273–294
- 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 seedlings of varying root volumes, *For. Sci.* 39: 275–294.
- Hernández M., E. 1985. Distribución y utilidad de los *Abies* en México. *Boletín del Instituto de Geografía* 15:75-118.
- Hines, F. D., and J. N. Long. 1986. First and second year survival of containerized Engelmann spruce in relation to initial seedling size. *Canadian Journal of Forest Research* 16: 668-670.

- Hobbs, S.D. Tesch, P. W. Owston, R. E. Stewart, J. C. Tappeiner and G. E. Wells. 1992. Reforestation practices in Southwestern Oregon and Northern California. Forest Research Laboratory, Oregon State University, Corvallis, OR
- Hobbs, S.D. 1984. The influence of species and stocktype selection on stand establishment: an ecophysiological perspective. In: Duryea ML, Brown GH (Eds.) Seedling physiology and reforestation success: Proceedings of the Physiology Working Group, Technical Session: Society of American Foresters National Convention, Portland, Oregon, USA, October 16-20, 1984
- Hsaio, T. C. 1973. Plant responses to water stress. *Annu. Rev. Plant Physiol.* 24: 519-570.
- Imo, M. and V. R. Timmer. 1999. Vector competition analysis of black spruce seedlings responses to nutrient loading and vegetation control. *Can J Res* 29(4): 474–486.
- Islam, M. A., K. G. Apostol, D. F. Jacobs, and R. K. Dumroese. 2009. Fall fertilization of *Pinus resinosa* seedlings: nutrient uptake, cold hardiness, and morphological development. *Annals of Forest Science* 66: 704–713
- Jacobs, D. F., K. F. Salifu, and A. S Davis. 2009. Drought susceptibility and recovery of transplanted *Quercus rubra* seedlings in relation to root system morphology. *Ann For. Sci.* 66(504): 12 p.
- Jacobs, D. F., R. C. Goodman, E. S. Gardiner, K. F. Salifu, R. P. Overton and G. Hernandez. 2012. Nursery stock quality as an indicator of bottomland hardwood forest restoration success in the Lower Mississippi River Alluvial Valley. *Scan J For Res* 27: 255–269
- Jacobs, D. F., R. Rose, D. L. Haase and P O. Alzugaray. 2004. Fertilization at planting impairs root system development and drought avoidance of Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii*) seedlings. *Ann. For. Sci.* 61: 643-65

- Kearws, E. V., and S. M. Assmann. 1993. The Guard Cell-Environment Connection. *Plant Physiology* 102: 711-715.
- Keyes H., M. R. 1996. Tecnología para la reforestación en América Latina, Madera y Bosques.2: 63-76
- Kozlowski, T .T. 2002. Physiological ecology of natural regeneration of harvested and disturbed forest: implications for forest management. *Forest ecology and management*. 158: 195-221
- Kozlowski ,T. T. and S. G. Pallardy,. 2002- Acclimation and adaptive response of woody plants to environmental stress. *Bot Rev* 68: 270–334
- Kramer, P. J., and T. T. Kozlowski. 1979. *Physiology of Woody Plants*. Academic Press, New York. 811 p.
- Lambin, E. F. and P. Meyfroidt. 2011. Global land use change, economic globalization, and the looming land scarcity. *Proc Natl Acad Sci* 108: 3465–3472
- Lamhamedi, M, S, P. Y. Bernier and C. Hérbert. 1997. Effect of shoot size on the gas exchange and growth of containerized *Picea mariana* seedlings under different watering regimes. *New For* 13: 209–223
- Landhausser, S. M., J. Rodriguez-Alvarez, E. H. Marenholtz and V. J. Lieffers. 2012. Effect of stock type characteristics and time of planting on field performance of aspen (*Populus tremuloides* Michx.) seedlings on boreal reclamation sites. *New Forests*. DOI 10.1007/s11056-012-9346-4
- Landis, T. D. 1985. Mineral nutrition as an index of seedling quality. *In: Evaluating Seedling Quality: Principles, Procedures and Predictive Abilities of Major Tests*. Duryea, M. (Ed.). For. Res. Lab., Oregon State University, Corvallis, OR. pp: 29-48

- Landis, T. D. and R. K Dumroese. 2006. Applying the Target Plant Concept to nursery stock quality. In: MacLennan, L., Fennessy, J. (Eds.), *Plant Quality: A Key to Success in Forest Establishment*. Proceedings of the COFORD Conference. National Council for Forest Research and Development, Dublin, Ireland, pp. 1–10.
- Landis, T. D., R. W. Tinus and J. P. Barnett .1999 . Seedling propagation. The container tree nursery manual, vol. 6. USDA Forest Service Agric. Handb. 674, Washington, DC, 167 pp
- Li, M. H., J. Yang, and N. Kräuchi. 2003. Growth responses of *Picea abies* and *Larix decidua* to elevation in subalpine areas of Tyrol, Austria. *Can. J. For. Res.* 33: 653-662.
- Li, G. L, Y. Lui, 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 olgensis* seedlings. *New For* 42: 215–226
- Lavender, D, P., R. Parish, C. M. Johnson, G. Montgomery, A. Vyse, R. A. Willis, and D. Winston (Eds). 1990. *Regenerating British Columbia's forests*. University of British Columbia Press, Vancouver, BC. 372 p.
- Lavender, D. P. and B. D. Cleary. 1974. Coniferous seedling production techniques to improve seedling establishment. In: Tinus RW, Stein WI, Balmer WE (Eds) *Proceedings of the North American containerized forest tree seedling symposium*. Great Plains Ag. Council Publ. No. 68, pp 177–180
- Margolis, H. A., and D. G. Brand. 1990. An ecophysiological basis for understanding plantation establishment. *Canadian Journal of Forest Research* 20: 375–390.
- Marschner, H. 1995. Effect of internal and external factors on root growth and development, in: Marschner H. (Ed.), *Mineral nutrition of higher plants*, 2nd ed. Academic Press, New York. pp. 508–536.

- Mattsson, A. 1996. Predicting field performance using seedling quality assessment. *New For* 13: 223–248
- McDowell, N., W. T. Pockman, C. D. Allen, D. D. Bershears, N. Cobb, T. Kolb, J. Plaut, J. Sperry, A. West, D. G. Williams, and E. A. Yezzer. 2008. Mechanisms of plant survival and mortality during drought: why do some plants survive while others succumb to drought?. *New Phytologist* 178: 719–739.
- 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.
- Millner, J. P., and P. D. Kemp. 2012. Foliar nutrients in *Eucalyptus* species in New Zealand. *New Forests*. 43: 255–266.
- Miller, P. C. 1983. Comparison of water balance characteristics of plant species in “natural” versus modified ecosystems. In: Mooney H. A, and Godron M (Eds) *Disturbance and ecosystems. Components of response*. Springer, Berlin, pp 188–212
- Moreno Ch., L. R., M. A. López L., E. Estañol B., y A. Velázquez M. 2002. Diagnóstico de necesidades de fertilización de *Abies religiosa* (H.B.K.) Schl. et Cham. en vivero mediante el DRIS. *Madera y Bosques* 8(1): 51-60.
- Moser, E. B., A. M. Saxton, and S. R. Pezeshki. 1990. Repeated measures analysis of variance: application to tree research. *Canadian Journal of Forest Research*. 20: 524-535.
- Naeem, S., L. J. Thompson, S. P. Lawler, J. H. Lawton and R. M. Woofin. 1994. Declining biodiversity can alter the performance of ecosystems. *Nature* 368: 734–737

- Oliet, J. A., J. M. Salazar, R. Villar, E. Robredo and F. Valladares. 2011. Fall fertilization of Holm oak affects N and P dynamics, root growth potential, and post-planting phenology and growth. *Ann For Sci* 68: 647–656
- Oliet, J. A., M. Tejada, K. F. Salifu, A. Collazos and D. F. Jacobs .2009a. Performance and nutrient dynamics of holm oak (*Quercus ilex* L.) seedlings in relation to nursery nutrient loading and post-transplant fertility. *Eur J Forest Res* 128: 253–263
- Oliet, J. A., R. Planelles, F. Artero, R. Valverde, D. F. Jacobs, M. Segura. 2009b. Field performance of *Pinus halepensis* planted in Mediterranean arid conditions: relative influence of seedling morphology and mineral nutrition. *New For* 37: 313–331
- Pinto, J. R., J. D. Marshall, R. K. Dumroese, A. S. Davis, R. Douglas and D. R. Cobos. 2011. Establishment and growth of container seedlings for reforestation: A function of stocktype and edaphic conditions. *For Ecol Manag* 261:1 876–1884
- Pharis, R. P. and P. J. Kramer. 1964. The effect of nitrogen and drought on loblolly pine seedlings. *For. Sci.* 10: 143–150.
- Puttonen, P. 1997. Looking for the “silver bullet”, can one test do it all? *New Forests* 13: 9–27.
- Ramirez C., A. y D. A. Rodriguez T. 2004. Efecto de calidad de planta, exposición y micrositio en una plantacion de *Quercus rugosa*. . *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 10: 5-11
- Ritchie, G. A and J. R. Dunlap .1980. Root growth potential: its development and expression in forest tree seedlings. *N Z J For Sci* 10:218–248
- Ritchie, G. A., T. D. Landis, R. K. Dumroese and D. L. Haase. 2010. Assessing plant quality. *In: The Container Tree Nursery Manual, Volume 7: Seedling Processing, Storage and Outplanting*. Landis, T. D., R. K. Dumroese, and D. L. Haase (Eds.). U. S.

- Department of Agriculture, Forest Service. Agric. Handbook 674. Washington, DC. pp: 17-81.
- Roberts, L., R. Stone and A. Sugden. 2009. The rise of restoration ecology. *Science* 325: 555
- Rook, D. E. 1991. Seedling development and physiology in relation to mineral nutrition. *In: Mineral Nutrition of Conifer Seedlings*. Van Den Driessche, R. (Ed). CRC Press. Boca Raton, Florida. pp: 85-101.
- 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. *Ann Sci* 60: 625–635.
- Rose, R., D. L Haase, F. Kroiher. and T. Sabin. 1997. Root volume and growth of ponderosa pine and Douglass-fir seedlings: a summary of eight growing seasons. *Western J. Appl. For.* 12: 69–73.
- Rose R., M. Atkinson, Gleason J. and Sabin T. 1991. Root volume as a grading criterion to improve field performance of Douglas-fir seedlings. *New Forest* 5: 195–209.
- Rose, R., S. J Campbell and T. D. Landis. (Eds), 1990. Target Seedling Symposium: Proceedings, Combined Meeting of the Western Forest Nursery Associations, Aug.13--17, Roseburg, OR. Gen. Tech. Rep. RM-200. USDA Forest ServiceRocky Mtn. For. Range Exp. Sta., 286pp.
- Salifu, K. F. and V.R. Timmer. 2001. Nutrient retranslocation response of *Picea mariana* seedlings to nitrogen supply. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65: 905–913.
- Salifu, K. F. and V. R. Timmer. 2003. Optimizing nitrogen loading in *Picea mariana* seedlings during nursery culture. *Can. J. For. Res.*33: 1287–1294.
DOI:10.1139/x03-057

- Salifu, K. F., K. G. Apostol, D. F. Jacobs and M. A. Islam. 2008. Growth, physiology, and nutrient retranslocation in nitrogen-15 fertilized *Quercus rubra* seedlings. *Ann For Sci* 65:101
- Sánchez G., A., L. López M. y D. Granados S. 2005. Semejanza florística entre los bosques de *Abies religiosa* (H.B.K.) Cham. & Schltdl. de la Faja Volcánica Transmexicana. *Investigaciones Geográficas* 56: 62-76.
- SAS (Statistical Analysis System) Institute. 2002. SAS/STAT Computer Software. Release 9.00. SAS Institute Inc. Cary, N. C. 5121 p.
- Saunders, D. A., R. J. Hobbs and C. R. Margules. 1991. Biological consequences of ecosystem fragmentation: a review. *Conservation Biology*. 5: 18–32.
- Scagel, R., R. Bowden, M. Madill and C. Kooistra. 1998. Provincial seedling stock type selection and ordering guidelines. British Columbia Ministry of Forests, Victoria, BC. 75 p.
- Simpson, D. G. and G. A. Ritchie. 1997. Does RGP predict field performance? A debate. *New For* 13: 253–277
- Smith, D. M. 1995. Forest stand regeneration: natural and artificial. In: Nierenberg, W. A. (Ed.). *Encyclopedia of Environmental Biology*. Vol. 2. Academic Press. San Diego, California, U.S.A. pp. 155-165
- Sutton, R. F. 1990. Root growth capacity in coniferous forest trees. *Hortic Sci*. 25: 259–266
- South, D. B., J. L. Rakestraw and G. A. Lowerts. 2001. Early gains from planting large diameter seedlings and intensive management are additive for loblolly pine. *New For* 21: 97–110

- Tan, W. X. and G. D Hogan. 1997. Physiological and morphological responses to nitrogen limitation in jack pine seedlings: potential implications for drought tolerance, *New For.* 14: 19–31.
- Thompson, B. E. 1985. Seedling morphological evaluation what you can tell by looking. *In: Evaluating Seedling Quality: Principles, Procedures, and Predictive Abilities of Major Tests.* Duryea, M. (Ed.). For. Res. Lab. Oregon State University, Corvallis, OR. pp. 59-71.
- Timmer, V. R. 1996. Exponential nutrient loading: a new fertilization technique to improve seedling performance on competitive sites. *New Forests* 13: 275–295.
- Timmer, V. R., and G. Armstrong. 1987. Growth and nutrition of containerized *Pinus resinosa* at exponentially increasing nutrient additions. *Canadian Journal of Forest Research* 17: 644-647.
- Tinus, R.W., 1996. Root growth potential as an indicator of drought stress history. *Tree Physiol.* 16, 795–799.
- Tinus, R. W. and S. E. McDonald. 1979. How to grow tree seedlings in containers in greenhouses. USDA Forest Service Gen. Tech. Rep. RM-60
- Tinus, R.W. 1974. Characteristics of seedlings with high survival potential. En: Tinus RW, Stein WI, Balmer WE (Eds) Proceedings of the North American containerized forest tree seedling symposium. Great Plains Ag. Council Publ. No. 68, pp 276–282
- Townend, J. 1995. Effects of elevated CO₂, water and nutrients on *Picea sitchensis* (Bong.) Carr. seedlings, *New Phytol.* 130: 193–206.
- Trubat, R., J. Cortina and A. Vilagrosa. 2008. Short-term nitrogen deprivation increases field performance in nursery seedlings of Mediterranean woody species. *J Arid Environ* 72: 879–890.

- Tsakaldimi, 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
- Tsakaldimi, M., T. Tsitsoni, G. Ganatsas and T. Zagas. 2009. A comparison of root architecture and shoot morphology between natural regenerated and container seedlings of *Quercus ilex* L. *Plant Soil* 324: 103–113
- Turner, J. and S. J. Mitchell. 2003. The effect of short day treatments on containerized Douglas-fir morphology, physiology and phenology. *New Forests* 26: 279-295.
- Valenzuela, R., T. Raymundo, y M. R. Palacios. 2004. Macromicetos que crecen sobre *Abies religiosa* en el eje Neovolcánico transversal. *Polibotánica* 18: 33-51.
- Van den Driessche, R. 1980. Effects of nitrogen and phosphorous fertilization on Douglas-Fir nursery growth and survival after outplanting. *Can J Res* 10: 65–70. DOI:10.1139/x80-011
- Van Den Driessche, R. 1987. Importance of current photosynthate to new root growth in planted conifer seedlings. *Can J Res* 17: 776–782. DOI:10.1139/x87-124
- Velázquez M., A. 1994. Multivariate analysis of the vegetation of the volcanoes Tláloc and Pelado, Mexico. *Journal of Vegetation Science* 5: 263-270.
- Villar-Salvador, P., J. Puértolas, J. L. Peñuelas and R. Planelles. 2005. Effect of nitrogen fertilization in the nursery on the drought and frost resistance of Mediterranean forest species. *Invest Agr Sist Recur For* 14(3): 408–418.
- Villar-Salvador, P., R. Penuelles, E. Enriquez, J. Penuelas and J. L. Rubira. 2004a. Nursery cultivation regimes, plant functional attributes, and field performance relationship in Mediterranean oak *Quercus ilex* L. *For Ecol Manage* 196: 257–266

- Villar-Salvador, P., R. Penuelles, J. Oliet, E. Enriquez, J. L. Penuelas, D. F. Jacobs, and M. Gonzalez M. 2004b. Drought tolerance and transplanting performance of holm oak (*Quercus ilex*) seedlings after drought hardening in the nursery. *Tree Physiol* 24: 1147–1155
- Vitousek, P. M., H. A. Mooney, J. Lubchenco and J. M. Melillo. 1997. Human dominance of earth's ecosystems. *Science*, 277: 494–499.
- Viveros, V. H. y J. J. Vargas H. 2007. Dormancia en yemas de especies forestales. *Revista chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*. 13: 131-135
- Viveros, V. H., C. Sáenz R., J. López U. y J. J. Vargas H. 2005 Variación genética altitudinal en el crecimiento de plantas de *Pinus pseudostrabus* Lindl. en campo. *Agrociencia* 39: 575-587.
- Wakeley, P. C. 1954. Planting the southern pines. *Agric. Monogr. No. 18*. USDA Forest Service Washington, DC, 233 p.
- Ward, J. S., M. Gent. and G.R Stephens. 2000. Effects of planting stock quality and browse protection-type on height growth of northern red oak and eastern white pine. *For. Ecol. Manage.* 127: 205–216.
- Wightman E., K., y C. B Santiago. 2003. La cadena de la reforestación y la importancia en la calidad de las plantas. *Foresta Veracruzana* 5: 45-51.
- Wilson, A. R., P. Nzokou, D. Güney, and S. Kulac. 2012. Growth response and nitrogen use physiology of Fraser fir (*Abies fraseri*), red pine (*Pinus resinosa*), and hybrid poplar under amino acid nutrition. *New Forests* pp. 1-15. DOI:10.1007/s11056-012-9317-9.
- Wilson, B. C. and D. F. Jacobs. 2006. Quality assessment of temperate zone deciduous hardwood seedlings. *New Forest* 31: 417–433

- Zipperer, W. C., T. W. Foresman., S. P. Walker and C. T. Daniel. 2012. Ecological consequences of fragmentation and deforestation in an urban landscape: a case study. *Urban Ecosyst.* DOI 10.1007/s11252-012-0238-3
- Zobel, B. J. and J. T. Talbert. 1984. *Applied forest tree improvement.* Wiley, New York. 524 p.
- Zweifel1, R., K. Steppe and F. J. Sterck. 2007. Stomatal regulation by microclimate and tree water relations: interpreting ecophysiological field data with a hydraulic plant model. *Journal of Experimental Botany* 58: 2113–2131